

Capítulo 21

El aparato circulatorio: vasos sanguíneos y hemodinamia



Vasos sanguíneos, hemodinamia y homeostasis

Los vasos sanguíneos contribuyen a la homeostasis proveyendo las estructuras para el flujo de sangre desde y hacia el corazón y el intercambio de nutrientes y desechos en los tejidos. También juegan un papel importante ajustando la velocidad y el volumen del flujo sanguíneo.



El aparato circulatorio contribuye a la homeostasis de otros aparatos y sistemas del organismo a través del transporte y distribución de la sangre a lo largo del cuerpo entregando sustancias (como oxígeno, nutrientes y hormonas) y retirando los desechos. Las estructuras involucradas en estas importantes tareas son los vasos sanguíneos. Éstos forman un sistema cerrado de conductos que reciben la sangre desde el corazón, la transportan a los tejidos del organismo y luego la devuelven al corazón. El lado izquierdo del corazón bombea sangre a través de aproximadamente 100 000 km

de vasos sanguíneos. El lado derecho del corazón bombea sangre a través de los pulmones, haciendo posible que la sangre capte oxígeno y descargue dióxido de carbono. Los capítulos 19 y 20 describen la composición y funciones de la sangre y la estructura y función del corazón. Este capítulo se centrará en la estructura y funciones de los diferentes tipos de vasos sanguíneos, en la **hemodinamia** (hemo-, de *héma*, sangre, y -dinamia, de *dýnamis*, fuerza), las fuerzas involucradas en la circulación de la sangre a lo largo del organismo y en los vasos sanguíneos, que constituyen las principales vías de circulación.

ESTRUCTURA Y FUNCIÓN DE LOS VASOS SANGUÍNEOS

▶ OBJETIVOS

- ▶ Contrastar la estructura y función de las arterias, arteriolas, capilares, vénulas y venas.
- ▶ Definir los vasos a través de los cuales la sangre se mueve en su paso desde el corazón hacia los capilares y de regreso.
- ▶ Distinguir entre reservorios de presión y reservorios de sangre.

Los cinco tipos principales de vasos sanguíneos son las arterias, las arteriolas, los capilares, las vénulas y las venas. Las **arterias** conducen la sangre *desde el corazón* hacia otros órganos. Las grandes arterias elásticas abandonan el corazón y se dividen en arterias musculares de mediano calibre que se distribuyen a lo largo de las diferentes regiones del organismo. Las arterias de mediano calibre se dividen luego en pequeñas arterias, que se dividen a su vez en arterias aún más pequeñas llamadas **arteriolas**. Cuando las arteriolas entran en un tejido, se ramifican en numerosos vasos diminutos llamados **capilares** (semejantes a cabellos). La delgada pared de los capilares permite el intercambio de sustancias entre la sangre y los tejidos corporales. Los grupos de capilares dentro de un tejido se reúnen para formar pequeñas venas llamadas **vénulas**. Éstas, a su vez, convergen formando vasos sanguíneos cada vez más grandes llamados venas. Las **venas** son los vasos sanguíneos que transportan la sangre desde los tejidos *de regreso hacia el corazón*. Como los vasos sanguíneos requieren oxígeno (O_2) y nutrientes al igual que los otros tejidos del organismo, los grandes vasos sanguíneos están irrigados por sus propios vasos sanguíneos, llamados **vasa vasorum** (literalmente, vasos de los vasos), localizados en el interior de sus paredes.

sanguíneos para proveer nutrición a las células tumorales. Los científicos están buscando sustancias que puedan inhibir la angiogénesis y así detener el crecimiento de los tumores. En la retinopatía diabética, la angiogénesis puede ser importante en el desarrollo de vasos sanguíneos que de hecho causan ceguera, de modo que el descubrimiento de inhibidores de la angiogénesis puede también prevenir la ceguera asociada con la diabetes. ■

Arterias

Como las **arterias** (ar-, de *aerō*, enlazar, y ter-, de *tero*, recorrer) se encuentran vacías en los cadáveres, en tiempos antiguos se creía que contenían sólo aire. La pared de una arteria posee tres capas o túnicas: 1) túnica interna, 2) túnica media y 3) túnica externa (**fig. 21-1**). La capa más interna, la **túnica interna** o **íntima**, contiene un revestimiento de epitelio pavimentoso simple llamado **endotelio**, una **membrana basal** y una capa de tejido elástico llamada **lámina elástica interna**. El endotelio es una capa continua de células que reviste la superficie interna de todo el sistema cardiovascular (el corazón y todos los vasos sanguíneos). Normalmente, el endotelio es el único tejido que tiene contacto con la sangre. La túnica interna está más cerca de la **luz**, el hueco central a través del cual fluye la sangre. La capa media, o **túnica media**, es normalmente la capa más gruesa. Está constituida por fibras elásticas y musculares lisas que se extienden en forma circular alrededor de la luz, de forma similar a como un anillo rodea un dedo. La túnica media también posee una **lámina elástica externa** compuesta por tejido elástico. Debido a su contenido en fibras elásticas, las arterias normalmente poseen alta **distensibilidad**, lo cual significa que sus paredes se estiran con facilidad o que se expanden sin romperse en respuesta a leves incrementos en la presión. La capa más externa, la **túnica externa**, está compuesta en su mayor parte por fibras elásticas y colágenas.

Las neuronas simpáticas del sistema nervioso autónomo se distribuyen en el músculo liso de la túnica media. El incremento en la actividad simpática estimula en forma característica al músculo liso a contraerse, comprimiendo la pared del vaso y estrechando la luz. Tal disminución en el diámetro de la luz de un vaso sanguíneo se denomina **vasoconstricción**. En contraste, las fibras de músculo liso se relajan cuando disminuye la estimulación simpática o cuando están presentes determinadas sustancias químicas, como el óxido nítrico, H^+ y ácido láctico. El incremento resultante en el diámetro de la luz se denomina **vasodilatación**. Cuando se lesiona una arteria o arteriola, su músculo liso se contrae, produciendo un espasmo vascular (vasoespasm) que limita el flujo sanguíneo a través del vaso lesionado y ayuda a reducir la pérdida de sangre si el vaso es pequeño.



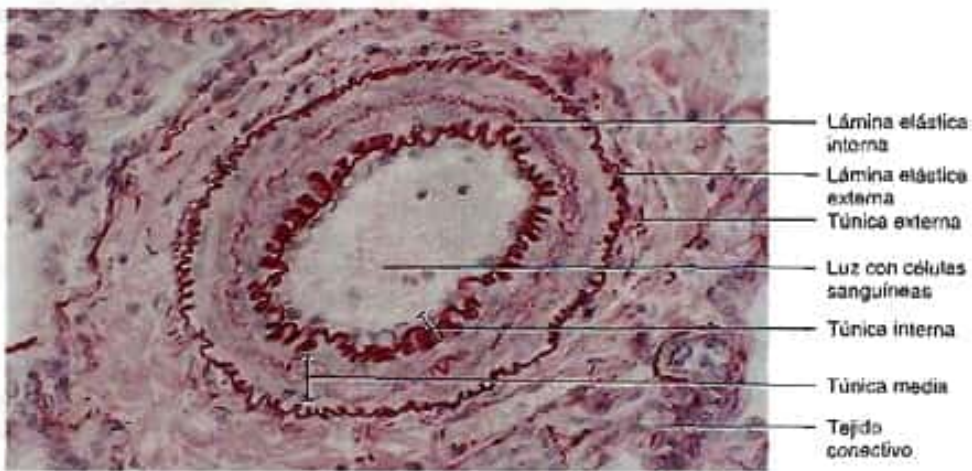
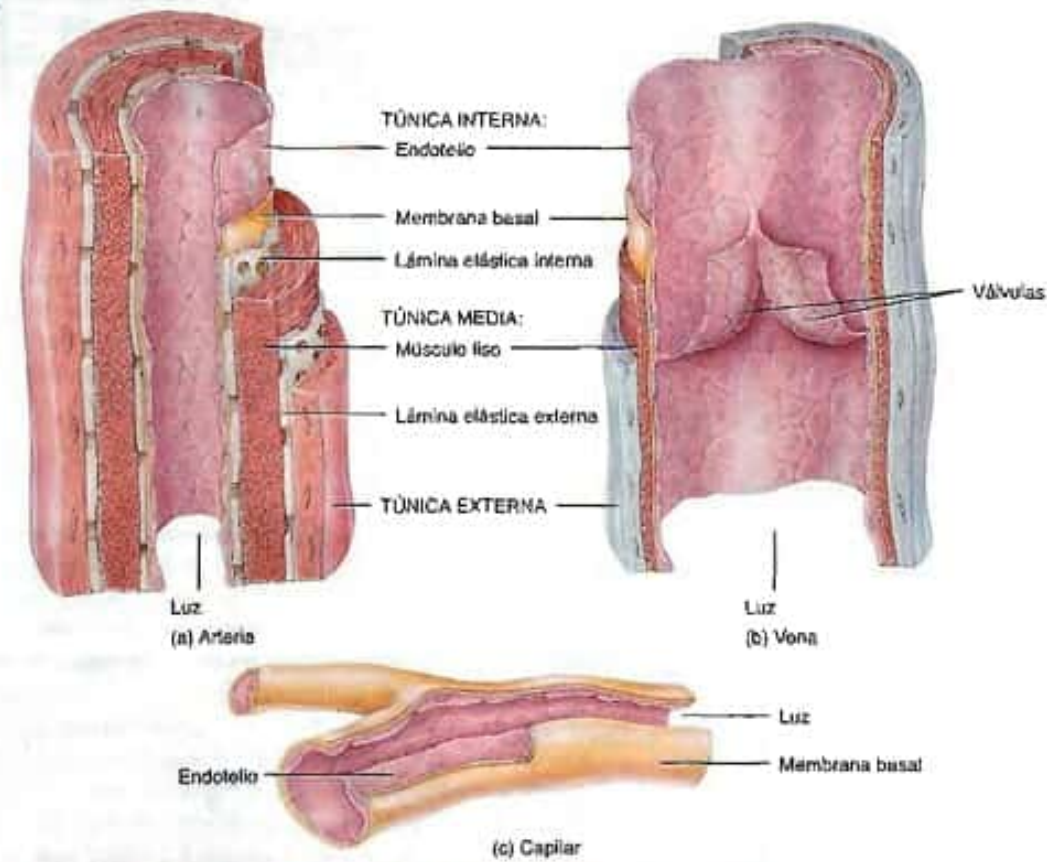
Angiogénesis y enfermedad

El término **angiogénesis** (angio-, de *angéion*, vaso, y -génesis, de *gennan*, producir) hace referencia al crecimiento de nuevos vasos sanguíneos. Es un proceso importante en el desarrollo embrionario y fetal, y en la vida posnatal posibilita importantes funciones como la curación de heridas, la formación de un nuevo revestimiento uterino luego de la menstruación, la formación del cuerpo lúteo luego de la ovulación y el desarrollo de vasos sanguíneos alrededor de arterias obstruidas en la circulación coronaria. Algunas proteínas (péptidos) son promotoras y otras inhibitoras de la angiogénesis.

Clínicamente, la angiogénesis es importante porque las células de un tumor maligno secretan proteínas llamadas **factores de angiogénesis tumoral (TAF)** que estimulan el crecimiento de los vasos

Fig. 21-1 Estructuras comparadas de los vasos sanguíneos. El capilar en (c) está agrandado en proporción a las estructuras mostradas en las partes (a) y (b).

Las arterias llevan la sangre desde el corazón hacia los tejidos; las venas llevan la sangre desde los tejidos hacia el corazón.



MO 200 x

(d) Sección transversal de una arteria muscular



MO 500 x

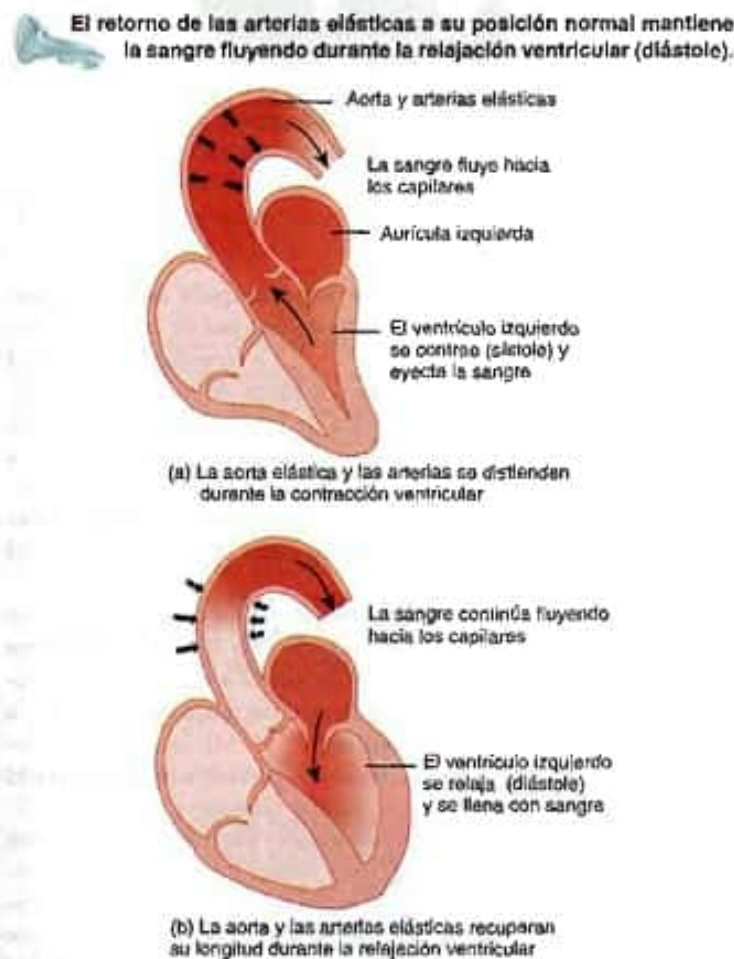
(e) Glóbulos rojos pasando a través de un capilar

¿Qué vaso —la arteria femoral o la vena femoral— posee una pared más gruesa? ¿Cuál de ellos posee una luz más amplia?

Arterias elásticas

Las arterias de mayor diámetro (superior a 1 cm) se llaman **arterias elásticas**, porque su túnica media contiene una proporción alta de fibras elásticas. Las arterias elásticas tienen paredes que son relativamente delgadas en proporción a su diámetro total. Su lámina elástica interna es incompleta y su lámina elástica externa es delgada. Las arterias elásticas realizan la importante función de ayudar a la propulsión de la sangre hacia delante mientras los ventrículos se están relajando. A medida que la sangre es eyectada desde el corazón hacia las arterias elásticas, sus paredes se distienden para captar la oleada de sangre, almacenando energía mecánica por un breve lapso; las fibras elásticas funcionan entonces como un **reservorio de presión** (fig. 21-2a). Entonces las fibras elásticas retornan a su longitud inicial y convierten la energía (potencial) almacenada en energía cinética, haciendo que la sangre fluya. De esta manera, la sangre continúa moviéndose a través de las arterias aun cuando los ventrículos están relajados (fig. 21-2b).

Fig. 21-2 La función de reservorio de presión de las arterias elásticas.



En la aterosclerosis, las paredes de las arterias elásticas se vuelven menos distensibles (más rígidas). ¿Qué efecto tiene la reducción de la distensibilidad en la función de reserva de presión de las arterias?

Las arterias elásticas también se denominan *arterias de conducción*, porque conducen la sangre desde el corazón hacia arterias más musculares, de mediano calibre. La aorta y el tronco braquiocefálico, la carótida común, la subclavia, la vertebral, la pulmonar y las arterias ilíacas comunes son arterias elásticas (véase fig. 21-18).

Arterias musculares

Las arterias de mediano calibre, con diámetros entre 0,1 y 10 mm, se denominan **arterias musculares** porque su túnica media contiene más músculo liso y menos fibras elásticas que las arterias elásticas. Por lo tanto, las arterias musculares son capaces de una mayor vasoconstricción y vasodilatación para ajustar la tasa del flujo sanguíneo. La mayor cantidad de músculo liso torna a las paredes de las arterias musculares relativamente más gruesas. Ellas poseen una delgada lámina elástica interna y una lámina elástica externa prominente. Las arterias musculares también se denominan *arterias de distribución*, porque distribuyen la sangre a las diferentes partes del organismo. Los ejemplos incluyen la arteria braquial en el brazo y la arteria radial en el antebrazo (véase fig. 21-18).

Arteriolas

Una **arteriola** (arteria pequeña) es una arteria muy pequeña (casi microscópica), con diámetros de entre 10 y 100 μm , que conduce la sangre a los capilares (fig. 21-3). Cerca de las arterias de las que nacen, las arteriolas tienen una túnica interna como la de las arterias, una túnica media compuesta por músculo liso y unas pocas fibras elásticas, y una túnica externa compuesta en su mayor parte por fibras elásticas y colágenas. En las arteriolas de menor diámetro, que están más cerca de los capilares, las túnicas están constituidas por poco más que un anillo de células endoteliales rodeadas por unas pocas fibras aisladas de músculo liso.

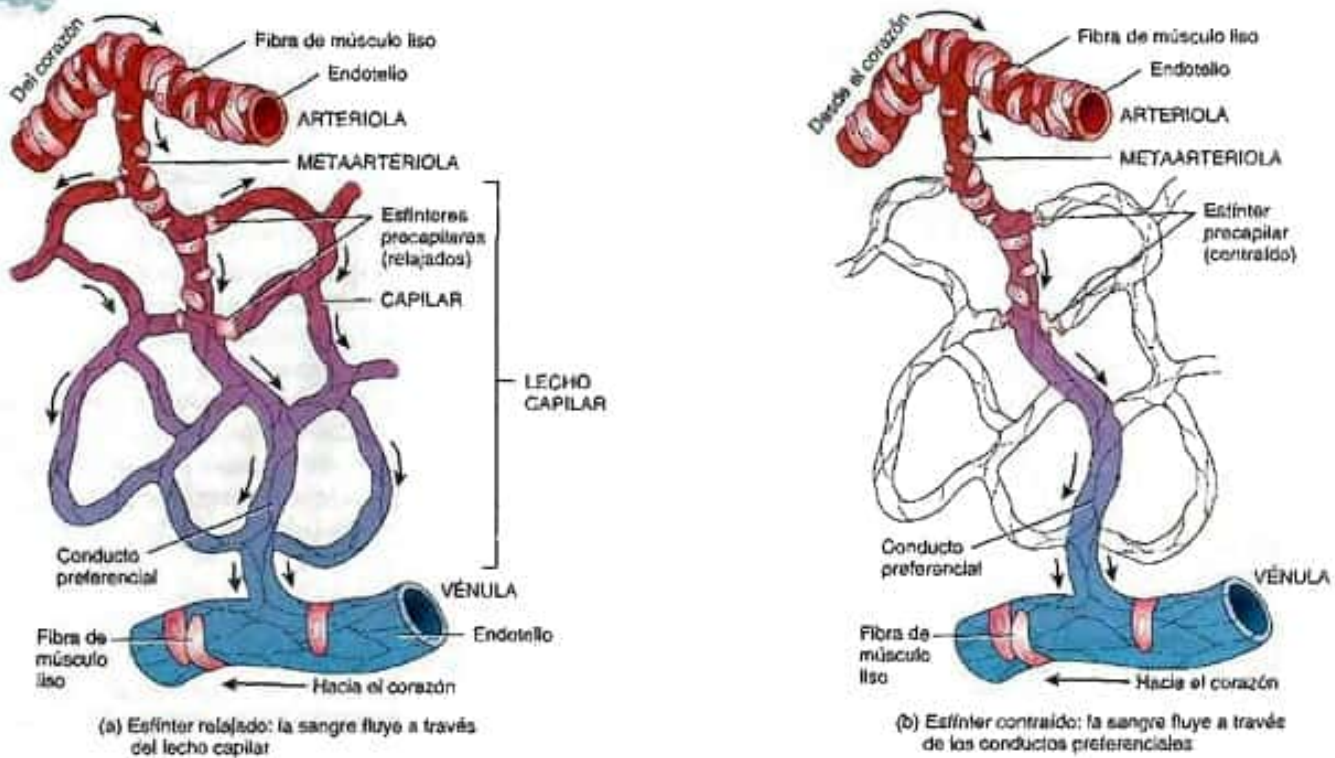
Las arteriolas juegan un papel clave en la regulación del flujo sanguíneo desde las arterias hacia los capilares regulando la resistencia, la oposición al flujo sanguíneo. En un vaso sanguíneo, la resistencia se produce principalmente por la fricción entre la sangre y las paredes internas del vaso sanguíneo. Cuanto más pequeño es el diámetro del vaso sanguíneo mayor es la fricción. Como la contracción y la relajación del músculo liso en las paredes de las arteriolas pueden cambiar su diámetro, las arteriolas se conocen como *vasos de resistencia*. La contracción del músculo liso arteriolar produce vasoconstricción, que incrementa la resistencia vascular y disminuye el flujo sanguíneo aportado por esa arteriola a los capilares. En contraste, la relajación del músculo liso arteriolar causa vasodilatación, que disminuye la resistencia vascular e incrementa el flujo sanguíneo hacia los capilares. Un cambio en el diámetro arteriolar puede afectar también la presión arterial: la vasoconstricción de las arteriolas incrementa la presión arterial, y la vasodilatación de las arteriolas la disminuye.

Capilares

Los **capilares** son vasos microscópicos que conectan las arteriolas con las vénulas (fig. 21-3); tienen diámetros de entre 4 y 10 μm . El flujo de sangre de las arteriolas a las vénulas a través de los capilares se denomina **microcirculación**. Los capilares se encuentran cerca de

Fig. 21-3 Arteriolas, capilares y vénulas. Los esfínteres precapilares regulan el flujo de sangre a través de los lechos capilares.

En los capilares, los nutrientes, gases y desechos son intercambiados entre la sangre y el líquido intersticial.



¿Por qué los tejidos metabólicamente activos poseen redes capilares extensas?

casi todas las células del organismo, pero su número varía en función de la actividad metabólica del tejido al cual irrigan. Los tejidos corporales con alto requisito metabólico, como los músculos, el hígado, los riñones y el sistema nervioso, usan más O_2 y nutrientes y por lo tanto tienen redes capilares extensas. Los tejidos con menores requisitos metabólicos, como los tendones y ligamentos, contienen menos capilares. Los capilares están ausentes en unos pocos tejidos, como todos los epitelios de cobertura, la córnea y el cristalino y el cartilago.

Los capilares se conocen como *vasos de intercambio* porque su principal función es el intercambio de nutrientes y desechos entre la sangre y las células tisulares a través del líquido intersticial. La estructura de los capilares está bien adaptada a esta función. Las paredes de los capilares están compuestas sólo por una capa de células endoteliales y una membrana basal (véase fig. 21-1c). No poseen túnica media ni túnica externa. Así, una sustancia en la sangre sólo debe pasar a través de una capa de células para alcanzar el líquido intersticial y las células de los tejidos. El intercambio de sustancias ocurre sólo a través de las paredes de los capilares y el comienzo de las vénulas; las paredes de las arterias, arteriolas, la mayoría de las vénulas y las venas presentan una barrera demasiado gruesa. Los capilares forman amplias redes ramificadas que incrementan la superficie disponible para un intercambio rápido de sustancias. En la mayoría de los tejidos, la sangre fluye a través de sólo una pequeña parte de la red capilar cuando las necesidades metabólicas son bajas. Pero cuando un tejido como el músculo está activo, toda la red capilar se llena de sangre.

Una **metaarteriola** (meta-, de *metá*, después de) es un vaso que emerge de una arteriola y abastece a una red de 10-100 capilares llamados **lecho capilar** (fig. 21-3a). La terminación proximal de una metaarteriola está rodeada por fibras de músculo liso discontinuo; la contracción y relajación de las fibras de músculo liso ayudan a regular el flujo sanguíneo a través del lecho capilar. La terminación distal de una metaarteriola, que se vacía en una vénula, no tiene fibras de músculo liso y se denomina **canal preferencial**. El flujo sanguíneo a través de un canal preferencial salta el lecho capilar.

En las uniones entre las metaarteriolas y los capilares del lecho capilar hay anillos de fibras de músculo liso llamados **esfínteres precapilares**, que controlan el flujo de sangre a través del lecho capilar. Cuando los esfínteres precapilares están relajados (abiertos), la sangre fluye dentro del lecho capilar (fig. 21-3a); cuando los esfínteres precapilares se contraen (cerrados o parcialmente cerrados), el flujo sanguíneo a través del lecho capilar disminuye o cesa (fig. 21-3b). Típicamente, la sangre fluye de manera intermitente a través del lecho capilar debido a la contracción y relajación alternante del músculo liso de las metaarteriolas y los esfínteres precapilares. Esta contracción y relajación alternante, que puede ocurrir 5 a 10 veces por minuto, se denomina **vasomotricidad**. En parte, la vasomotricidad se debe a sustancias químicas liberadas por las células endoteliales; el óxido nítrico es un ejemplo. En cada momento, la sangre fluye sólo a través del 25% del lecho capilar.

El organismo contiene tres tipos diferentes de capilares: capilares continuos, fenestrados y sinusoides (fig. 21-4). Muchos capilares son **capilares continuos**, en los cuales las membranas plasmáticas de las células endoteliales forman un tubo continuo que sólo es interrumpido por **hendiduras intercelulares**, que son brechas entre células endoteliales vecinas (fig. 21-4a). Los capilares continuos se encuentran en el músculo liso y esquelético, tejido conectivo y en los pulmones.

Otros capilares del organismo son los **capilares fenestrados**. Las membranas plasmáticas de las células endoteliales en estos capilares poseen muchas **fenestraciones**, pequeños poros (agujeros) con diámetros entre 70 y 100 nm (fig. 21-4b). Los capilares fenestrados se encuentran en los riñones, en las vellosidades del intestino delgado, en el plexo coroideo de los ventrículos del cerebro y en algunas glándulas endocrinas.

Los **sinusoides** son más amplios y tortuosos que otros capilares. Sus células endoteliales pueden tener fenestraciones inusualmente grandes. Además de tener una membrana basal incompleta o ausente, los sinusoides tienen hendiduras intercelulares muy grandes (fig. 21-4c). Se encuentran sinusoides en el hígado, la médula ósea roja, el bazo y algunas glándulas endocrinas.

Por lo general, la sangre pasa por el corazón y luego en secuencia a través de las arterias, arteriolas, capilares, vénulas y venas y entonces vuelve al corazón. En algunas partes del cuerpo, sin embargo, la sangre pasa desde una red capilar a otra, a través de una vena llamada vena porta. Este tipo de circulación sanguínea se denomina **sistema porta**. El nombre del sistema porta está dado por la localización del segundo capilar. Hay sistemas porta asociados con la glándula hipófisis (sistema porta hipofisario) y el hígado (circulación porta hepática).

Vénulas

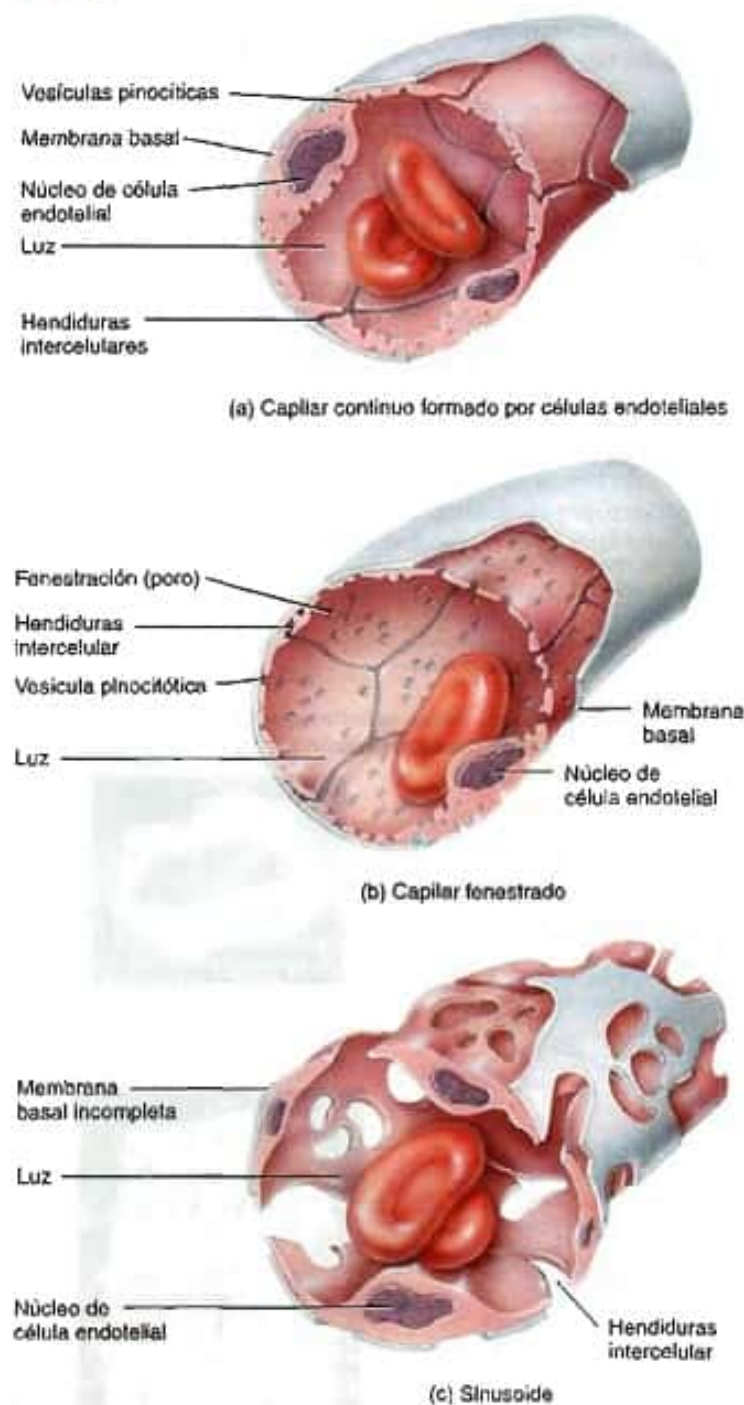
Cuando varios capilares se unen, forman pequeñas venas llamadas **vénulas** (vena pequeña). Las vénulas, que poseen diámetros de entre 10 y 100 μm , recogen la sangre de los capilares y la envían hacia las venas. Las vénulas más pequeñas, aquellas más próximas a los capilares, están constituidas por una túnica interna de endotelio y una túnica media que contiene sólo unas pocas fibras de músculo liso aisladas. Como los capilares, las paredes de las pequeñas vénulas son muy porosas; a través de ellas muchas células blancas fagocíticas emigran desde el torrente sanguíneo hacia un tejido inflamado o infectado. Las vénulas más grandes que convergen para formar venas contienen la **túnica externa** característica de las venas (véase fig. 21-1b).

Venas

El diámetro de las venas varía entre 0,1 mm y más de 1 mm. A pesar de que las venas están compuestas esencialmente por las tres mismas capas (túnicas) que las arterias, el espesor relativo de las capas es diferente. La túnica interna de las venas es más delgada que la de las arterias; la túnica media de las venas es mucho más delgada que en las arterias, con relativamente poco músculo liso y fibras elásticas. La túnica externa de las venas es la capa más gruesa y está formada por fibras elásticas y de colágeno. Las venas no tienen la

Fig. 21-4 Tipos de capilares.

Los capilares son vasos sanguíneos microscópicos que conectan las arteriolas con las vénulas.



¿Cómo se mueven las sustancias a través de las paredes de los capilares?

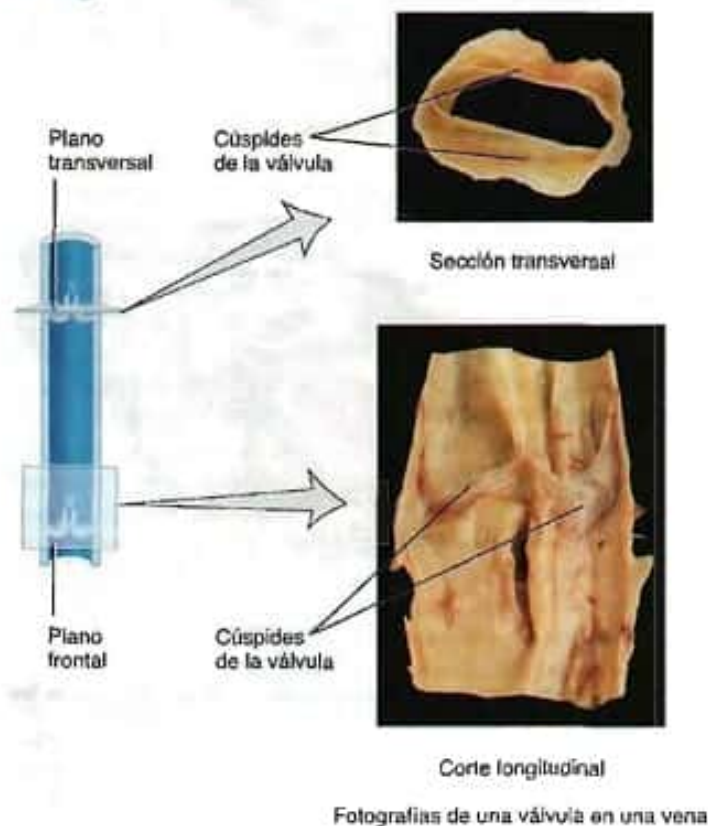
lámينا elástica interna o externa que se encuentra en las arterias (véase fig. 21-1b). Son lo suficientemente distensibles para adaptarse a las variaciones de volumen y presión de la sangre que pasa a través de ellas, pero no están diseñadas para resistir alta presión. La luz de una vena es mayor que la de una arteria de tamaño comparable y las venas a menudo aparecen colapsadas (aplanadas) cuando se seccionan.

Muchas venas, especialmente aquellas localizadas en los miembros, también presentan **válvulas**, delgados pliegues de túnica interna que forman **cúspides** como solapas. Las cúspides (válvulas) de las válvulas se proyectan hacia la luz, apuntando en dirección al corazón (fig. 21-5). La baja presión sanguínea en las venas hace que la sangre que está regresando al corazón se entelezca e incluso retroceda; las válvulas ayudan al retorno venoso impidiendo el reflujo de sangre.

Un **seno vascular (venoso)** es una vena con una pared endotelial fina que no posee músculo liso para modificar su diámetro. En un seno venoso es el tejido conectivo denso que lo rodea el que actúa de soporte en lugar de la túnica media y la externa. Por ejemplo, los senos venosos duros, que son sostenidos por la duramadre, transportan sangre desoxigenada desde el cerebro hacia el corazón. Otro ejemplo de un seno vascular es el seno coronario del corazón (véase fig. 20-3c)

Fig. 21-5 Válvulas venosas.

Las válvulas en las venas permiten que la sangre fluya en sólo una dirección, hacia el corazón.



¿Por qué las válvulas son más importantes en las venas del brazo o de la pierna que en las del cuello?

Venas varicosas

Las válvulas venosas insuficientes pueden determinar que las venas se dilaten y se vuelvan tortuosas en su apariencia, una condición denominada **venas varicosas** (de *varicosus*, vena dilatada) o **várices**. Este trastorno puede producirse en las venas de casi cualquier parte del cuerpo, pero es más común en el esófago y en las venas superficiales de los miembros inferiores. Estas últimas pueden representar desde un problema estético hasta un problema médico grave. El defecto valvular puede ser congénito o consecuencia del estrés mecánico (estar de pie durante mucho tiempo o el embarazo) o del envejecimiento. Las válvulas venosas insuficientes permiten el reflujo de sangre y su rémora. Esto, a su vez, genera una presión que distiende las venas y permite al líquido extravasarse en el tejido circundante. Como resultado, las venas afectadas y el tejido que las rodea se pueden inflamar y tornarse dolorosos a la palpación. Las venas más superficiales, especialmente la safena, tienen una alta susceptibilidad para las varicosidades; las venas más profundas no son tan vulnerables porque el músculo esquelético que las rodea impide que sus paredes se distiendan demasiado. Las venas varicosas en el canal anal se conocen como **hemorroides**. Las várices esofágicas son el resultado de la dilatación de las venas de las paredes de la parte más baja del esófago y a veces de la parte superior del estómago. Las várices esofágicas sangrantes, que pueden ser fatales, son usualmente el resultado de una enfermedad hepática crónica.

Existen varias opciones de tratamiento disponibles para las venas varicosas de los miembros inferiores. Las **medias elásticas** (de soporte) se pueden utilizar en individuos con síntomas moderados o para quienes las otras opciones no son recomendables. La **escleroterapia** consiste en la inyección de una solución dentro de las venas varicosas que daña la túnica interna y produce una tromboflebitis (inflamación con un coágulo de sangre) superficial. La cicatrización de las partes dañadas conduce a la formación de una cicatriz que ocluye la vena. La **oclusión endovenosa por radiofrecuencia** es la aplicación de energía de radiofrecuencia que calienta y colapsa las venas varicosas. La **oclusión láser** usa terapia lumínica para obtener las venas. En un procedimiento quirúrgico denominado **flebectomía** las venas se extirpan. En este procedimiento se enhebra un cable flexible a través de la vena y luego se tracciona y extirpa la vena del cuerpo. ■

Anastomosis

La mayoría de los tejidos del organismo reciben sangre de más de una arteria. La unión de las ramas de dos o más arterias que irrigan la misma región del organismo se denomina **anastomosis** (de *anastómosis*, abocamiento). Las anastomosis entre arterias proveen vías alternativas para que la sangre alcance un tejido u órgano. Si el flujo sanguíneo se detiene por un breve lapso cuando los movimientos normales comprimen un vaso, o si un vaso es obstruido por una lesión, cirugía o enfermedad, la circulación hacia una parte del organismo no necesariamente se interrumpe. Una vía alternativa para el flujo sanguíneo para una parte del organismo a través de una anastomosis se conoce como **circulación colateral**. Las anastomosis también pueden encontrarse entre venas y entre arteriolas y vénulas. Las arterias que no se anastomosan se conocen como **arterias ter-**

CUADRO 21-1 Características distintivas de los vasos sanguíneos

	Diámetro	Túnica interna	Túnica media	Túnica externa	Función
Arterias elásticas	Mayor de 1 cm	Endotelio, membrana basal y lámina elástica interna incompleta.	Músculo liso y mayor proporción de fibras elásticas y lámina elástica externa delgada.	Colágeno y fibras elásticas.	Conducir la sangre desde el corazón hasta las arterias musculares.
Arterias musculares	0,1 – 10 mm	Endotelio, membrana basal y lámina elástica interna delgada.	Mayor proporción de músculo liso, menos fibras elásticas y lámina elástica externa prominente.	Colágeno y fibras elásticas.	Distribuir la sangre a las arteriolas.
Arteriolas (cerca de las arterias de las cuales se bifurcan)	10 – 100 μm	Endotelio, membrana basal y lámina elástica interna.	Músculo liso y muy pocas fibras elásticas.	Colágeno y fibras elásticas.	Entregar la sangre a los capilares y ayudar a regular el flujo sanguíneo.
Capilares	4 – 10 μm	Endotelio y membrana basal.	No.	No.	Permitir el intercambio de nutrientes y desechos entre la sangre y el líquido intersticial.
Vénulas (más cerca de la convergencia con las venas)	10 – 100 μm	Endotelio y membrana basal.	Músculo liso.	Colágeno y fibras elásticas.	Recoger la sangre de los capilares y conducirla a las venas.
Venas	0,1 – mayores de 1 mm	Endotelio y membrana basal; contienen válvulas.	Músculo liso y fibras elásticas.	Colágeno y fibras elásticas.	Devolver la sangre al corazón, facilitado por las válvulas en los miembros inferiores.

minales. La obstrucción de una arteria terminal interrumpe el suministro de sangre a todo un segmento de un órgano, produciendo necrosis (muerte) de ese segmento. Los vasos no anastomóticos que irrigan la misma región del organismo pueden proveer también vías sanguíneas alternativas.

Un resumen de las características distintivas de los vasos sanguíneos se presenta en el cuadro 21-1.

Distribución sanguínea

En reposo la mayor parte del volumen sanguíneo —alrededor del 64%— se encuentra en las venas y vénulas sistémicas. Las arterias y arteriolas sistémicas contienen alrededor del 13% del volumen sanguíneo, los capilares sistémicos contienen alrededor del 7%, los vasos sanguíneos pulmonares contienen alrededor del 9%, y el corazón alberga alrededor del 7%. Como las venas y vénulas sistémicas contienen un gran porcentaje del volumen sanguíneo, funcionan como **reservorios de sangre** desde los cuales la sangre puede ser desviada rápidamente si es necesario. Por ejemplo, durante el aumento de la actividad muscular, el centro cardiovascular en el tronco encefálico envía un gran número de impulsos simpáticos a las venas. El resultado es la **venoconstricción**, la contracción de las venas, la cual reduce el volumen de sangre en los reservorios y permite que un mayor volumen sanguíneo fluya al músculo esquelético, donde se necesita más. Un mecanismo similar aparece en caso de hemorragia, cuando el volumen y la presión de la sangre disminuyen; en este caso, la venoconstricción ayuda a contrarrestar la caída de la presión arterial. Entre los principales reservorios de sangre se encuentran las venas de los órganos abdominales (especialmente el hígado y el bazo) y las venas de la piel.

Fig. 21-6 La distribución de la sangre en el aparato circulatorio en reposo.

Como las venas y vénulas sistémicas contienen más de la mitad del total del volumen sanguíneo, se llaman reservorios de sangre.



Si su volumen sanguíneo total es de 5 litros, ¿qué volumen está en sus venas y vénulas en este momento? ¿Y en sus capilares?

► PREGUNTAS DE REVISIÓN

1. ¿Cuál es la función de las fibras elásticas y el músculo liso en la túnica media de las arterias?
2. ¿Qué diferencias hay entre las arterias elásticas y las arterias musculares?
3. ¿Qué características estructurales de los capilares permiten el intercambio de materiales entre la sangre y las células del organismo?
4. ¿Cuál es la diferencia entre reservorios de presión y reservorios de sangre? ¿Por qué es importante cada uno de ellos?
5. ¿Cuál es la relación entre las anastomosis y la circulación colateral?

INTERCAMBIO CAPILAR

► OBJETIVO

Examinar las presiones que causan el movimiento de los líquidos entre los capilares y los espacios intersticiales.

La misión de todo el aparato cardiovascular es mantener a la sangre fluyendo a través de los capilares para permitir el **intercambio capilar**, el movimiento de sustancias entre la sangre y el líquido intersticial. En cada momento, el 7% de la sangre dentro de los capilares sistémicos está continuamente intercambiando materiales con el líquido intersticial. Las sustancias entran y abandonan los capilares por tres mecanismos básicos: difusión, transcitosis y flujo de masa o masivo.

Difusión

El método más importante de intercambio capilar es la difusión simple. Muchas sustancias, como oxígeno (O_2), dióxido de carbono (CO_2), glucosa, aminoácidos y hormonas, entran y salen de los capilares por difusión simple. Como normalmente el O_2 y los nutrientes se encuentran en altas concentraciones en la sangre, difunden según sus gradientes de concentración hacia el líquido intersticial y luego hacia el interior de las células del organismo. El CO_2 y otros desechos liberados por las células corporales están presentes en mayores concentraciones en el líquido intersticial y por lo tanto difunden hacia la sangre.

Las sustancias en la sangre o en el líquido intersticial pueden cruzar las paredes de un capilar difundiendo a través de las hendiduras intercelulares o fenestraciones, o hacerlo a través de las células endoteliales (véase fig. 21-4). Las sustancias hidrosolubles, como la glucosa y los aminoácidos, atraviesan las paredes de los capilares a través de las hendiduras intercelulares o fenestraciones. Los materiales liposolubles, como el O_2 , CO_2 y hormonas esteroideas, pueden atravesar las paredes de los capilares directamente a través de la bicapa lipídica de la membrana plasmática de las células endoteliales. La mayoría de las proteínas plasmáticas y de los eritrocitos no pueden pasar a través de las paredes de los capilares continuos y fenestrados porque son demasiado grandes para atravesar las hendiduras intercelulares y fenestraciones.

En los sinusoides, sin embargo, las hendiduras intercelulares son tan grandes que permiten pasar a través de sus paredes incluso a las proteínas y células sanguíneas. Por ejemplo, los hepatocitos (células hepáticas) sintetizan y liberan muchas proteínas plasmáticas, como el fibrinógeno (la principal proteína coagulante) y la albúmina, las cuales difunden hacia el torrente sanguíneo a través de los sinusoides. En la médula ósea roja se forman las células sanguíneas (hemopoyesis) y luego ellas entran al torrente sanguíneo a través de los sinusoides.

A diferencia de los sinusoides, los capilares del cerebro sólo permiten a unas pocas sustancias moverse a través de sus paredes. La mayoría de las áreas del cerebro contienen capilares continuos; sin embargo, estos capilares son muy "estrechos". Las células endoteliales de la mayoría de los capilares cerebrales están selladas entre sí por uniones estrechas. El resultante bloqueo del movimiento de sustancias hacia dentro y hacia fuera de los capilares cerebrales se conoce como la *barrera hematoencefálica* (véase p. 477). En las áreas del encéfalo donde falta la barrera hematoencefálica, por ejemplo el hipotálamo, la glándula pineal y la glándula hipófisis, las sustancias se intercambian en los capilares con mayor facilidad.

Transcitosis

Una pequeña cantidad de material cruza las paredes capilares por **transcitosis** (trans-, de *trans*, a través de; cito-, de *kytos*, célula, y -osis, de *osis*, proceso). En este proceso, las sustancias en el plasma sanguíneo son englobadas dentro de pequeñas vesículas pinocíticas que primero entran a las células endoteliales por endocitosis, luego cruzan la célula y salen por el otro lado por exocitosis. Este método de transporte es importante principalmente para moléculas grandes, insolubles en lípidos, que no pueden cruzar las paredes de los capilares de ninguna otra forma. Por ejemplo, la hormona insulina (una proteína pequeña) entra en el torrente sanguíneo por transcitosis, y ciertos anticuerpos (también proteínas) pasan desde la circulación materna hacia la circulación fetal por transcitosis.

Flujo de masa: filtración y reabsorción

El **flujo de masa** es un proceso pasivo en el cual un gran número de iones, moléculas o partículas disueltas en un líquido se mueven juntas en la misma dirección. Las sustancias se mueven a velocidades mucho mayores de las que pueden alcanzarse únicamente por difusión. El flujo de masa se establece desde un área de mayor presión hacia un área de menor presión, y continúa mientras exista esta diferencia de presión. La difusión es más importante para el *intercambio de solutos* entre la sangre y el líquido intersticial, pero el flujo de masa es más importante para la regulación de los *volúmenes relativos de la sangre y del líquido intersticial*. El movimiento generado por la presión de los líquidos y solutos desde los capilares sanguíneos hacia el líquido intersticial se llama **filtración**. El movimiento generado por la presión desde el líquido intersticial hacia los capilares sanguíneos se llama **reabsorción**.

Dos presiones promueven la filtración: la **presión hidrostática sanguínea (PHS)**, presión generada por la acción de bomba del corazón y la **presión osmótica del líquido intersticial**. La principal presión que promueve la reabsorción de líquido es la **presión osmótica coloidal o coloidosmótica de la sangre**. El balance de estas presiones,

llamado **presión neta de filtración (PNF)**, determina si el volumen de sangre y de líquido intersticial permanece en equilibrio o cambia. En general, el volumen de líquidos y solutos reabsorbidos en condiciones normales es casi tan grande como el volumen filtrado. Esta proximidad al equilibrio se conoce como la **ley de Starling de los capilares**. Veamos cómo se equilibran estas presiones hidrostáticas y osmóticas.

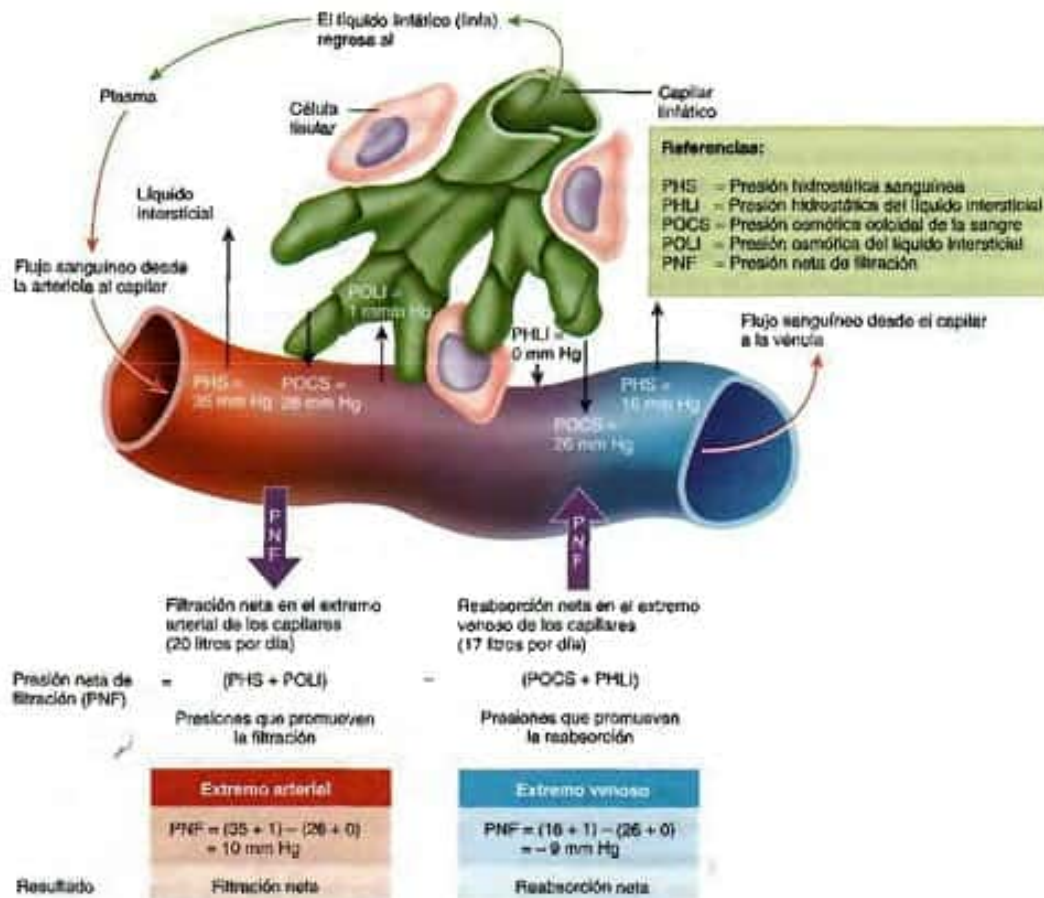
En los vasos, la presión hidrostática se debe a la presión que el agua del plasma sanguíneo ejerce contra las paredes de los vasos sanguíneos. La **presión hidrostática sanguínea (PHS)** es de alrededor de 35 milímetros de mercurio (mm Hg) en el extremo arterial de un capilar, y de alrededor de 16 mm Hg en el extremo venoso (Fig. 21-7). La PHS "empuja" el líquido fuera de los capilares hacia el líquido intersticial. La presión del líquido intersticial que se le opone, llamada **presión hidrostática del líquido intersticial (PHLI)**, "empuja" líquido desde los espacios intersticiales de vuelta hacia los capilares. Sin embargo, la PHLI es cercana a cero. (La PHLI es difícil de medir, y los valores informados varían desde pequeños valores positivos a pequeños valores negativos.) En esta exposición se asume que la PHLI es igual a 0 mm Hg a todo lo largo de los capilares.

La diferencia en la presión osmótica a través de la pared capilar se debe casi completamente a la presencia de proteínas plasmáticas en la sangre, que son demasiado grandes para atravesar tanto las fenestraciones como las brechas entre las células endoteliales. La **presión osmótica coloidal de la sangre (POCS)** se debe a la suspensión coloidal de estas grandes proteínas en el plasma y promedia los 26 mm Hg en la mayoría de los capilares. El efecto de la POCS es el de "atraer" líquido de los espacios intersticiales hacia los capilares. Oponiéndose a la POCS tenemos la **presión osmótica del líquido intersticial (POLI)**, que "atrae" líquido de los capilares hacia el líquido intersticial. Normalmente, la POLI es muy pequeña -0,1 a 5 mm Hg- porque sólo mínimas cantidades de proteínas están presentes en el líquido intersticial. El pequeño número de proteínas que se filtra desde el plasma sanguíneo dentro del líquido intersticial no se acumula allí porque entra en la circulación linfática y es devuelta a la sangre. Para este análisis, podemos usar un valor de 1 mm Hg para la POLI.

Que un líquido abandone o entre en los capilares depende del equilibrio de presiones. Si las presiones que expulsan el líquido hacia fuera de los capilares excede a las presiones que atraen el líqui-

Fig. 21-7 Dinámica del intercambio capilar (ley de Starling de los capilares). El exceso de líquido filtrado drena en los capilares linfáticos.

La presión hidrostática sanguínea expulsa el líquido fuera de los capilares (filtración), y la presión osmótica coloidal de la sangre atrae líquido hacia los capilares (reabsorción).



Una persona con insuficiencia hepática no puede sintetizar la cantidad normal de proteínas plasmáticas. ¿Cómo afecta un déficit de proteínas plasmáticas la presión osmótica coloidal de la sangre, y cuál es el efecto en la filtración y reabsorción capilar?