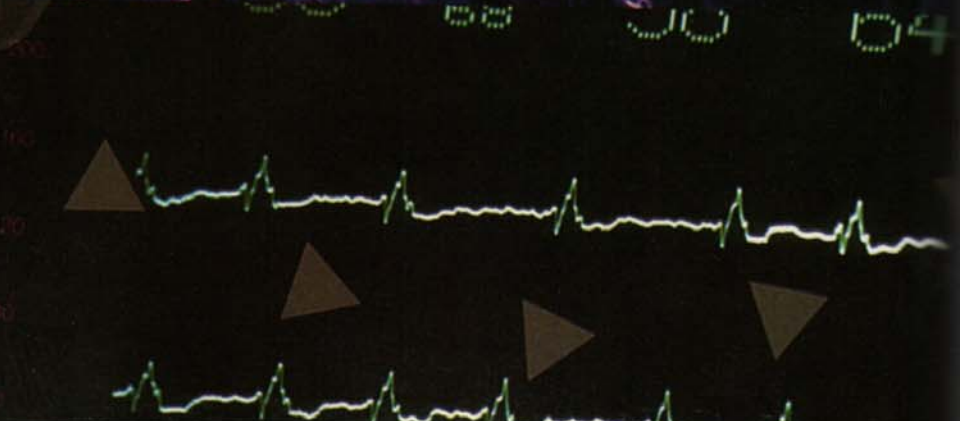
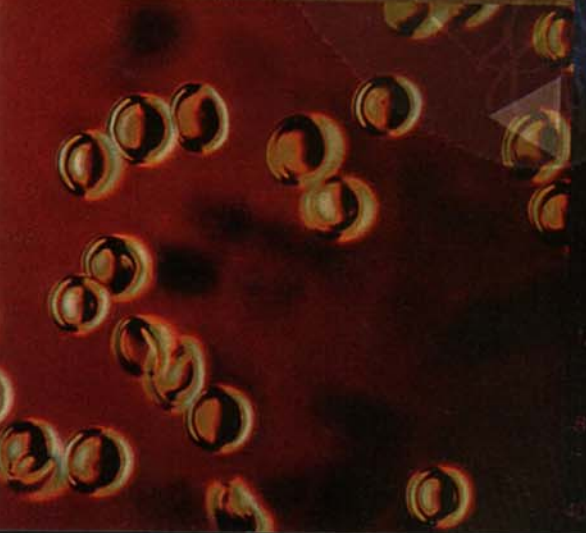
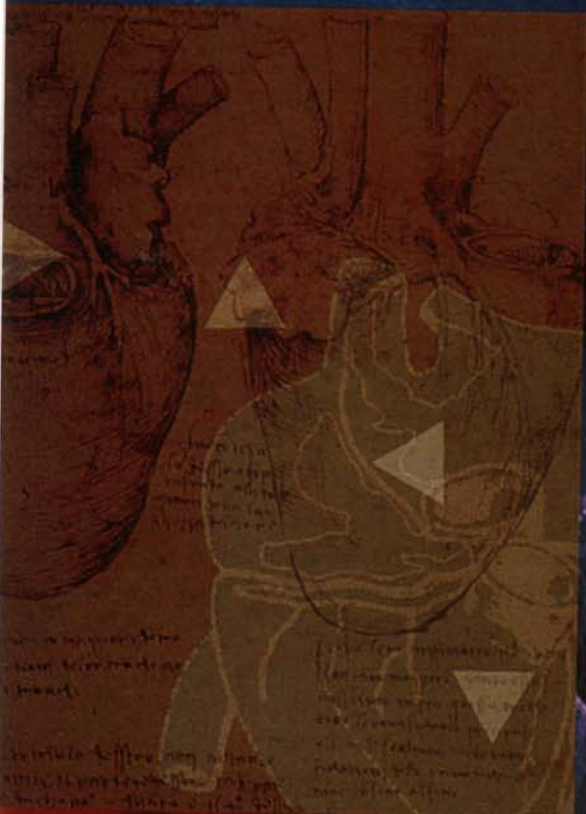


C A P Í T U L O

7

Control cardiovascular durante el ejercicio



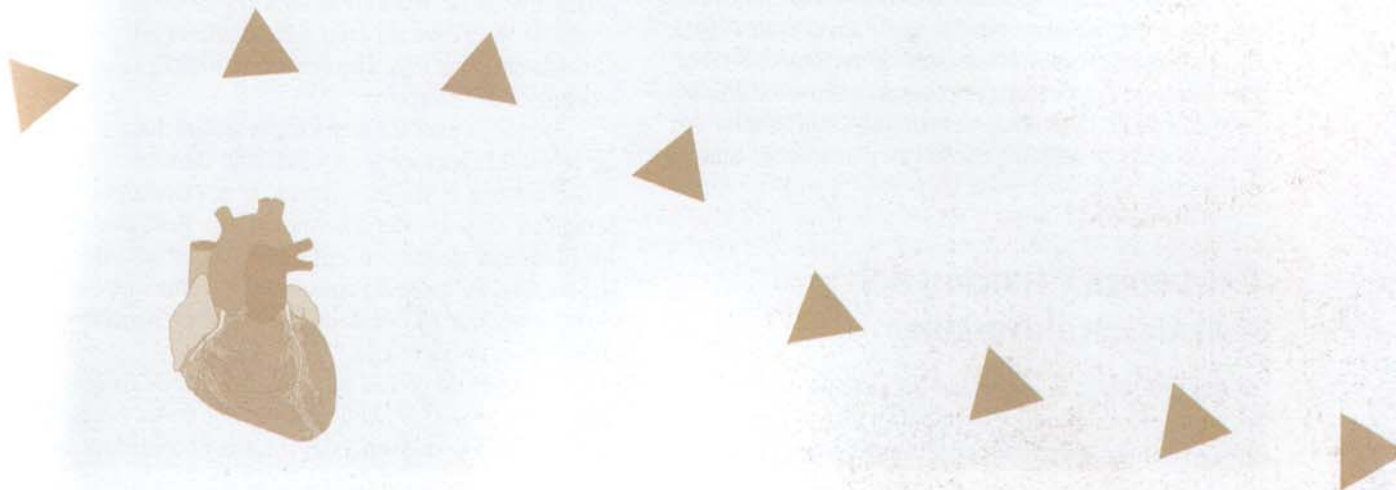
Visión general del capítulo


Nuestro sistema cardiovascular, que incluye el corazón, los vasos sanguíneos y la sangre, tiene muchas funciones, incluidas las de nutrición, protección e incluso la de transporte de desechos. El sistema debe llegar a todas las células del cuerpo, y debe poder responder inmediatamente a cualquier cambio en el ambiente interno para mantener todos los sistemas del cuerpo funcionando con la máxima eficacia. Incluso cuando estamos en reposo, nuestro sistema cardiovascular trabaja constantemente para satisfacer las demandas de los tejidos de nuestro cuerpo. Pero durante el ejercicio se impone un número más elevado de demandas mucho más urgentes sobre este sistema.

En este capítulo, exploraremos la asombrosa función que juega el sistema cardiovascular en la actividad física. En la primera parte del capítulo analizaremos la estructura y la función del sistema cardiovascular, poniendo de relieve sus complejidades. En la segunda parte, nos centraremos en el modo en que el sistema cardiovascular responde a las exigencias aumentadas del ejercicio. Aprenderemos cómo cada componente de este sistema se adapta a los cambios en el ambiente interno del cuerpo que resultan de los ritmos aumentados de la actividad física y cómo el sistema controla nuestra capacidad para rendir.

Esquema del capítulo

- Estructura y función del sistema cardiovascular, 208
 - Corazón, 208
 - EKG, 213
 - Sistema vascular, 216
 - Sangre, 220
- Respuesta cardiovascular al ejercicio, 222
 - Frecuencia cardíaca, 223
 - Volumen sistólico, 225
 - Gasto cardíaco, 228
 - Cambios generales en la función cardíaca, 229
 - Flujo de sangre, 230
 - Tensión arterial, 234
 - Sangre, 235
- Integración de la respuesta al ejercicio, 237
- Conclusión, 239
- Expresiones clave, 239
- Cuestiones a estudiar, 240
- Bibliografía, 240
- Lecturas seleccionadas, 242





El día 5 de enero de 1988, el deporte mundial perdió a uno de sus deportistas más grandes. "Pistol Pete" Maravich, vieja estrella de la National Basketball Association, sufrió un colapso y falleció de un paro cardíaco a los 40 años de edad durante un partido de baloncesto retransmitido por televisión. Su muerte causó una conmoción, y la causa de la misma sorprendió a los expertos médicos. El corazón de Maravich estaba anormalmente agrandado debido principalmente al hecho de que había nacido con una sola arteria coronaria en el lado derecho del corazón –le faltaban las dos arterias coronarias que abastecen el lado izquierdo del corazón–. La comunidad médica quedó asombrada de que esta sola arteria coronaria del lado derecho hubiese estado abasteciendo el lado izquierdo del corazón de Maravich, y que esta adaptación le hubiese permitido competir durante muchos años como uno de los mejores jugadores en la historia del baloncesto.

El sistema cardiovascular realiza un determinado número de importantes funciones en el cuerpo. La mayoría de ellas dan apoyo a otros sistemas fisiológicos. Las principales funciones cardiovasculares se pueden clasificar dentro de cinco categorías distintas:

1. Distribución.
2. Eliminación.
3. Transporte.
4. Mantenimiento.
5. Prevención.

Consideremos algunos ejemplos. El sistema cardiovascular distribuye nutrientes y oxígeno, y elimina dióxido de carbono y productos metabólicos de deshecho, de todas las células del cuerpo. Transporta hormonas desde las glándulas endocrinas hasta sus receptores objetivo. El sistema mantiene la temperatura del cuerpo, y la capacidad de amortiguamiento de la sangre ayuda a controlar el pH del cuerpo. El sistema cardiovascular mantiene unos niveles apropiados de fluido para prevenir la deshidratación y ayuda a prevenir las infecciones causadas por organismos invasores.

Aunque ésta es una lista abreviada, estas funciones cardiovasculares mencionadas son importantes para comprender las bases fisiológicas de la actividad física. Pero antes de examinar las respuestas cardiovasculares específicas de la actividad, necesitamos contemplar los componentes del sistema cardiovascular y cómo funcionan juntos.

Estructura y función del sistema cardiovascular

Es impresionante la capacidad del sistema cardiovascular para responder inmediatamente a las muchas y siempre cambiantes necesidades del cuerpo. Todas las funcio-

nes corporales y virtualmente cada una de las células del cuerpo dependen de algún modo de este sistema.

Cualquier sistema de circulación requiere tres componentes:

1. Una bomba (el corazón).
2. Un sistema de canales (los vasos sanguíneos).
3. Un medio fluido (la sangre).

Examinemos cada uno de ellos por separado.

Corazón

El corazón, mostrado en la figura 7.1, tiene dos aurículas actuando como cámaras de recepción y dos ventrículos como unidades de emisión. El corazón es la bomba principal que hace circular la sangre por todo el sistema vascular. Veamos el camino que sigue la sangre cuando se desplaza a través del corazón.

Flujo sanguíneo a través del corazón

La sangre que ha seguido su curso entre las células del cuerpo, aportando oxígeno y nutrientes y recogiendo los productos de deshecho, vuelve a través de las grandes venas –la vena cava superior y la vena cava inferior– a la aurícula derecha. Esta cámara recibe toda la sangre desoxigenada del cuerpo.

Desde la aurícula derecha, la sangre pasa a través de la válvula tricúspide al ventrículo derecho. Esta cámara bombea la sangre a través de la válvula pulmonar semilunar hasta la arteria pulmonar, que lleva la sangre a los pulmones derecho e izquierdo. Así, el lado derecho del corazón es conocido como el lado pulmonar, enviando la sangre que ha circulado por el cuerpo hacia los pulmones para reoxigenarla.

Después de recibir un aporte fresco de oxígeno, la sangre abandona los pulmones a través de las venas pulmonares, que la vuelven a llevar hacia el corazón y hacia

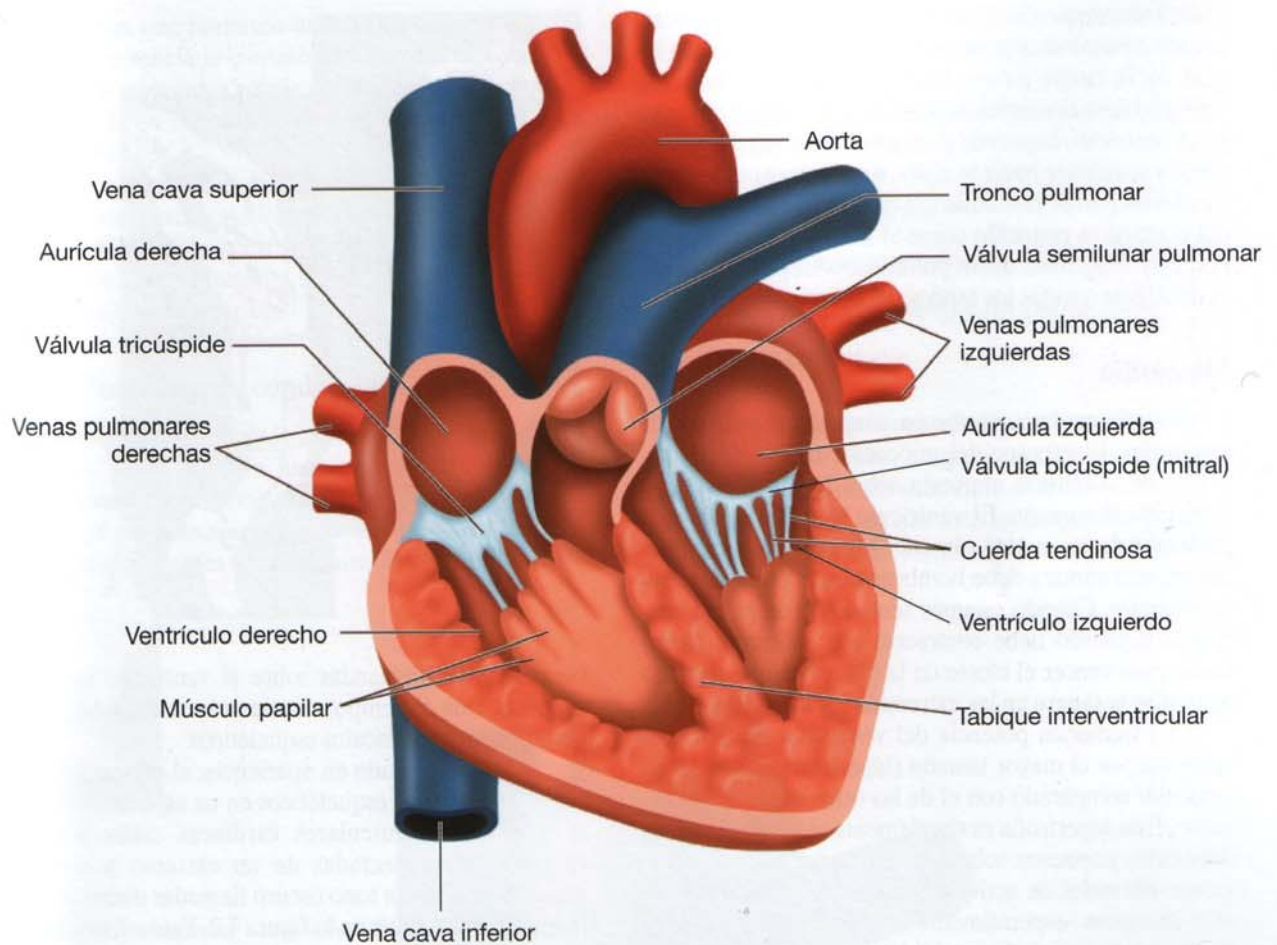


Figura 7.1 Anatomía del corazón humano.

Murmullo del corazón

Las cuatro válvulas impiden el reflujo de la sangre, asegurando un flujo unidireccional a través del corazón. Estas válvulas maximizan la cantidad de sangre bombeada desde el corazón durante la contracción. El murmullo del corazón es una condición en la que se detectan sonidos cardíacos anormales con la ayuda de un estetoscopio. Normalmente, las válvulas del corazón hacen un chasquido característico cuando se cierran. Con el murmullo, el chasquido es sustituido por un sonido similar al de un silbido. Este sonido anormal puede indicar la presencia de un flujo turbulento de sangre a través de una válvula estrechada o defectuosa. Puede indicar también la existencia de un flujo errante de sangre a través de un agujero en la pared que separa los lados derecho e izquierdo del corazón (defecto septal).

Los murmullos del corazón son muy comunes en los niños en desarrollo y en los adolescentes. Durante los períodos de crecimiento, el desarrollo de las válvulas no siempre prosigue al mismo ritmo que el agrandamiento de las aberturas cardíacas. Las válvulas pueden tener pérdidas incluso en el caso de los adultos. Con un prolapso de la válvula mitral, ésta (bicúspide) deja que una cierta cantidad de sangre refluya hacia la aurícula izquierda durante la contracción ventricular. Este trastorno, común en los adultos (entre el 6% y el 17% de la población), incluidos los deportistas, suele tener poca trascendencia clínica a menos que haya un importante reflujo.

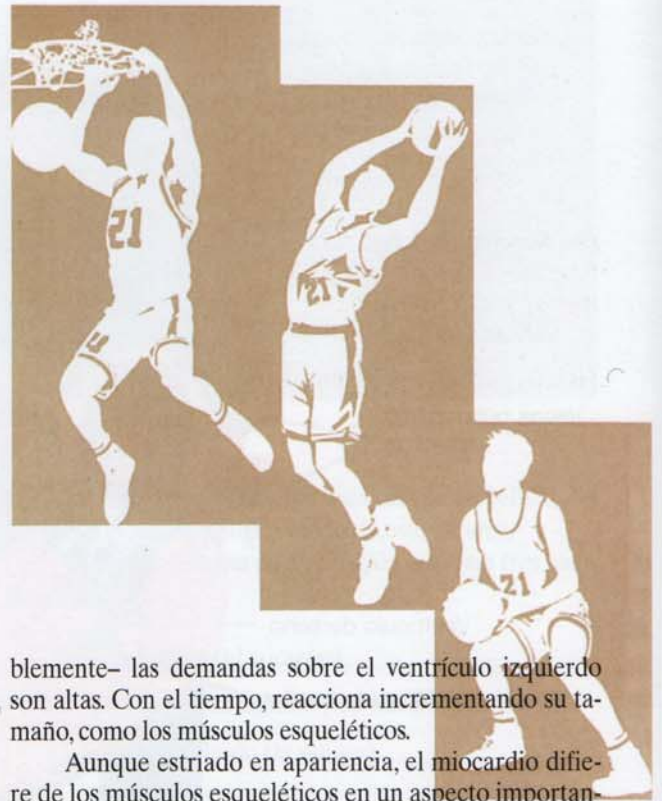
La mayoría de murmullos en los deportistas son benignos, sin afectar el bombeo del corazón ni el rendimiento del deportista. Pero los murmullos del corazón pueden indicar la presencia de unas válvulas enfermizas, como por ejemplo las que tienen estenosis, en cuyo caso la válvula se ha estrechado y con frecuencia se ha hecho más gruesa y rígida. Esta condición puede requerir la sustitución quirúrgica de la válvula.

la aurícula izquierda. Toda la sangre recientemente oxigenada es recibida por esta cámara. Desde la aurícula izquierda, la sangre pasa a través de la válvula bicúspide (mitral) hacia el ventrículo izquierdo. La sangre abandona el ventrículo izquierdo pasando a través de la válvula aórtica semilunar hacia la aorta, que finalmente la envía a todas las partes y sistemas del cuerpo. El lado izquierdo del corazón es conocido como el lado sistémico. Recibe la sangre oxigenada de los pulmones y luego la envía para abastecer a todos los tejidos del cuerpo.

Miocardio

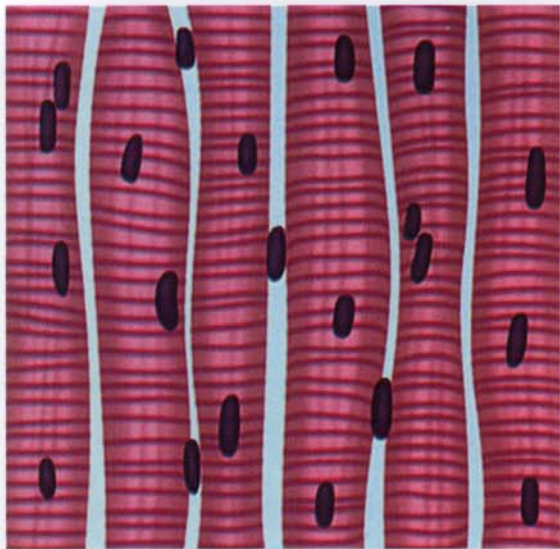
El músculo cardíaco recibe en conjunto el nombre de **miocardio**. El espesor del miocardio depende directamente de la tensión impuesta sobre las paredes de las cámaras del corazón. El ventrículo izquierdo es la más poderosa de las cuatro cámaras. Mediante sus contracciones, esta cámara debe bombear sangre por toda la ruta sistémica. Cuando estamos sentados o de pie, el ventrículo izquierdo debe contraerse con suficiente fuerza como para vencer el efecto de la gravedad, que tiende a acumular la sangre en las extremidades inferiores.

La tremenda potencia del ventrículo izquierdo es reflejada por el mayor tamaño (hipertrofia) de su pared muscular comparado con el de las otras cámaras del corazón. Esta hipertrofia es simplemente el resultado de las demandas impuestas sobre ella en reposo o bajo condiciones normales de actividad moderada. Con ejercicios más enérgicos —especialmente en las actividades aeróbicas intensas, durante las cuales las necesidades de sangre de los músculos en funcionamiento aumentan considera-

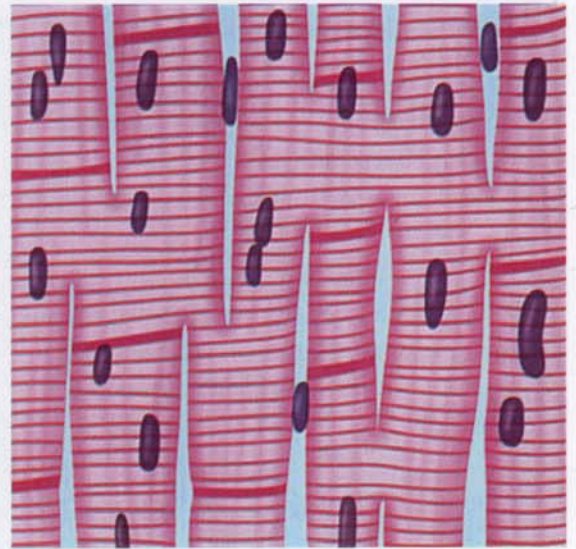


blemente— las demandas sobre el ventrículo izquierdo son altas. Con el tiempo, reacciona incrementando su tamaño, como los músculos esqueléticos.

Aunque estriado en apariencia, el miocardio difiere de los músculos esqueléticos en un aspecto importante. Las fibras musculares cardíacas están anatómicamente interconectadas de un extremo a otro por regiones teñidas en tono oscuro llamadas discos intercalados, tal como se ve en la figura 7.2. Estos discos tienen desmosomas, que son estructuras que unen las células individuales para que no se separen durante la contrac-



a



b

Figura 7.2 Micrografías de (a) músculo esquelético y (b) músculo cardíaco. Ambos tipos de músculo presentan forma estriada, pero sólo las fibras de músculo cardíaco están conectadas con discos intercalados de tinción más oscura.

ción, e hiatos, que permiten una rápida transmisión del impulso que señala la contracción. Estas características permiten al miocardio actuar como una sola fibra muscular grande en las cuatro cámaras: todas las fibras se contraen a la vez.

Para comprender de qué modo se coordinan las contracciones cardíacas, debemos entender cómo se origina la señal para la contracción y cómo viaja a través del corazón. Estas funciones son ejecutadas por el sistema cardíaco de conducción.

Sistema cardíaco de conducción

El músculo cardíaco tiene la capacidad única de generar su propia señal eléctrica, llamada autoconducción, lo que le permite contraerse rítmicamente sin estimulación neural. Sin estimulación neural ni hormonal, la frecuencia cardíaca intrínseca efectúa entre 70 y 80 latidos (con-

tracciones) por minuto, pero en las personas que siguen entrenamientos de resistencia puede descender a niveles inferiores.

La figura 7.3 ilustra los cuatro componentes del sistema cardíaco de conducción:

1. Nódulo senoauricular.
2. Nódulo auriculoventricular.
3. Fascículo auriculoventricular (haz de His).
4. Fibras de Purkinje.

El impulso para la contracción cardíaca se inicia en el nódulo senoauricular, un grupo de fibras musculares cardíacas especializadas sitas en la pared posterior de la aurícula derecha. Dado que este tejido genera el impulso, generalmente a una frecuencia de alrededor de 60 u

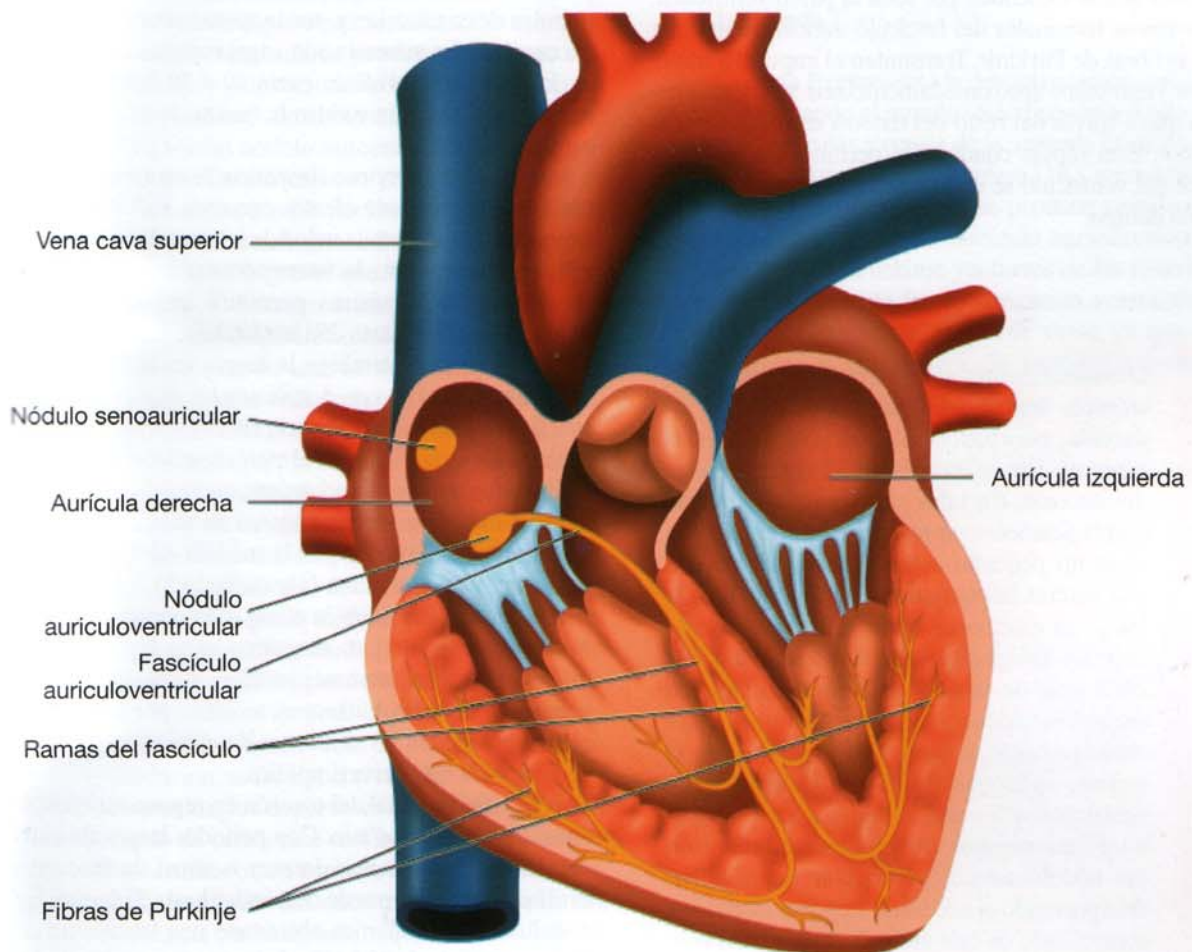


Figura 7.3 Sistema cardíaco de conducción.

80 latidos por minuto al nódulo senoauricular se le conoce como el marcapasos cardíaco, y el ritmo de los latidos que establece recibe el nombre de ritmo sinusal. El impulso eléctrico generado por el nódulo senoauricular se difunde por los dos ventrículos y llega hasta el nódulo auriculoventricular, localizado en la pared auricular cerca del centro del corazón. Cuando el impulso se difunde a través de los ventrículos, reciben la señal de contraerse, lo que hacen casi inmediatamente.

El nódulo auriculoventricular dirige el impulso desde las aurículas hasta los ventrículos. El impulso es retrasado aproximadamente 0,13 s cuando pasa a través del nódulo auriculoventricular, y después entra en el fascículo auriculoventricular. Este retraso permite que las aurículas se contraigan antes de que lo hagan los ventrículos, maximizando el llenado ventricular. El fascículo auriculoventricular viaja a lo largo del tabique ventricular y luego envía ramificaciones de los fascículos derecho e izquierdo hacia ambos ventrículos. Estas ramificaciones envían el impulso hacia el ápice cardíaco, y luego hacia fuera. Cada rama del fascículo se divide en otras mucho menores que se extienden por toda la pared ventricular. Estas ramas terminales del fascículo auriculoventricular son las fibras de Purkinje. Transmiten el impulso a través de los ventrículos aproximadamente seis veces más deprisa que a través del resto del sistema cardíaco de conducción. Esta rápida conducción permite que todas las partes del ventrículo se contraigan aproximadamente al mismo tiempo.

Ocasionalmente, se desarrollan problemas crónicos dentro del sistema cardíaco de conducción, estorbando su capacidad para mantener un ritmo apropiado del seno a través del corazón. En tales casos, puede instalarse quirúrgicamente un marcapasos artificial. Éste es un pequeño estimulador eléctrico con una batería, implantado generalmente bajo la piel, con electrodos adheridos al ventrículo derecho. Un ejemplo de cuándo resulta útil es en el caso de un trastorno llamado bloqueo auriculoventricular. Con este trastorno, el nódulo senoauricular activa su impulso, pero el impulso es bloqueado en el nódulo auriculoventricular y no puede llegar a los ventrículos. El marcapasos artificial asume la función del nódulo auriculoventricular imposibilitado, aportando el necesario impulso eléctrico y controlando de este modo la contracción ventricular.

Control extrínseco de la actividad del corazón

Aunque el corazón inicia sus propios impulsos eléctricos (control intrínseco), su sincronización y efectos pueden ser alterados. Bajo condiciones normales, esto se logra principalmente a través de tres sistemas extrínsecos:

1. El sistema nervioso parasimpático.
2. El sistema nervioso simpático.
3. El sistema endocrino (hormonas).

Aunque aquí se ofrece una visión general de sus efectos, éstos se tratan con más detalle en los capítulos 2 y 5.

El sistema parasimpático, una rama del sistema nervioso autónomo, actúa sobre el corazón mediante el nervio vago (nervio craneal X). En reposo, la actividad del sistema parasimpático predomina en un estado referido como tono vagal. El nervio vagal tiene un efecto depresivo sobre el corazón; disminuye la velocidad del impulso de conducción y, por lo tanto, reduce la frecuencia cardíaca. La estimulación vagal máxima puede reducir la frecuencia cardíaca entre 20 y 30 latidos/min. El nervio vago también reduce la fuerza de la contracción cardíaca.

El sistema nervioso simpático, la otra rama del sistema autónomo, tiene efectos opuestos. La estimulación simpática incrementa la velocidad de conducción del impulso y, por lo tanto, la frecuencia cardíaca. La estimulación simpática máxima permitirá que la frecuencia cardíaca se eleve hasta 250 latidos/min. La entrada simpática incrementa también la fuerza de la contracción. El sistema simpático predomina en las situaciones de estrés físico o emocional, cuando las exigencias corporales son más elevadas. Una vez el estrés remite, el sistema parasimpático vuelve a predominar.

El sistema endocrino ejerce su efecto a través de las hormonas liberadas por la médula adrenal: la noradrenalina y la adrenalina (ver capítulo 5). Estas hormonas son conocidas también como catecolaminas. Al igual que el sistema nervioso simpático, estas hormonas estimulan el corazón, incrementando su ritmo. De hecho, la liberación de estas hormonas se inicia por la estimulación simpática en las ocasiones de estrés y sus acciones prolongan la respuesta simpática.

El ritmo normal del corazón en reposo suele oscilar entre 60 y 85 latidos/min. Con períodos largos de entrenamiento de resistencia (meses o años), la frecuencia cardíaca en reposo puede descender hasta 35 latidos/min o incluso menos. Hemos observado una frecuencia cardíaca en reposo de 28 latidos/min en un corredor de fondo de categoría mundial. Se dice que estos reducidos rit-

mos cardíacos son el resultado de una mayor estimulación parasimpática (tono vagal), con una reducida actividad simpática que probablemente representa un papel menos importante.

Arritmias cardíacas

En ocasiones, determinadas alteraciones en la secuencia normal de los acontecimientos cardíacos pueden llevar a un ritmo irregular del corazón, llamado arritmia. El grado de gravedad de estos trastornos varía. La bradicardia y la taquicardia son dos tipos de arritmias. **Bradicardia** significa "corazón lento" e indica una frecuencia cardíaca en reposo inferior a 60 latidos/min, mientras que **taquicardia** significa "corazón rápido" e indica una frecuencia cardíaca superior a 100 latidos/min. Con estas arritmias, el ritmo sinusal resulta alterado con frecuencia. La función del corazón puede ser normal, pero su sincronización es anormal, lo cual puede afectar la circulación. Entre los síntomas de ambas arritmias se hallan la fatiga, vértigos, mareos y desvanecimientos. La taquicardia también puede causar palpitaciones.

También tienen lugar otras arritmias. Por ejemplo, las **contracciones ventriculares prematuras**, que producen la sensación de palpitaciones o latidos extra, son relativamente comunes y son el resultado de impulsos que se originan fuera del nódulo senoauricular. El flúter auricular, en el que las aurículas se contraen a ritmos de 200 a 400 latidos/min, y la fibrilación auricular, en la que las aurículas se contraen de un modo rápido y descoordinado, son arritmias más graves que hacen que las aurículas bombeen poca o ninguna sangre. La **taquicardia ventricular**, definida como tres o más contracciones ventriculares prematuras, es una arritmia muy grave que produce una **fibrilación ventricular** en la que la contracción del tejido ventricular es descoordinada. Cuando esto sucede, el corazón no puede bombear sangre. La mayoría de las muertes cardíacas son consecuencia de fibrilaciones ventriculares. El uso de un desfibrilador para provocar mediante una sacudida que el corazón vuelva a su ritmo sinusal normal debe llevarse a cabo antes de transcurridos unos pocos minutos para que la víctima sobreviva. La reanimación cardiopulmonar impone un ritmo normal al corazón y puede mantener la vida durante varias horas, pero las posibilidades de supervivencia son mayores si el tratamiento de emergencia, incluida la desfibrilación, se facilita con rapidez.

Curiosamente, los deportistas con un alto grado de entrenamiento de resistencia con frecuencia desarrollan bajos ritmos cardíacos en reposo, una adaptación ventajosa, como resultado del entrenamiento. Asimismo, nuestra frecuencia cardíaca, naturalmente, se acelera durante la actividad física para satisfacer las mayores demandas de esfuerzo. Estas adaptaciones no deben con-

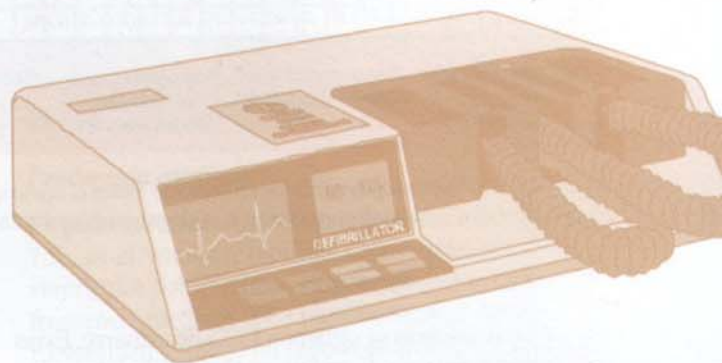
fundirse con la bradicardia ni con la taquicardia, que son alteraciones anormales en la frecuencia cardíaca en reposo que suelen indicar la existencia de un trastorno patológico.

ECG

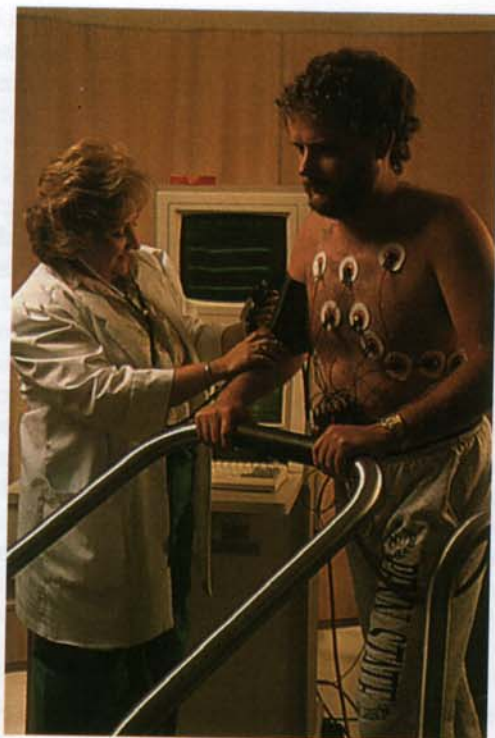
La actividad eléctrica del corazón debe registrarse para diagnosticar potenciales problemas cardíacos o para controlar cambios en el corazón. El principio implicado es sencillo: los fluidos corporales son buenos conductores eléctricos. Los impulsos eléctricos generados en el corazón son conducidos a través de los fluidos corporales hasta la piel, donde pueden detectarse e imprimirse mediante una máquina sensible llamada electrocardiógrafo. Esta impresión se llama **electrocardiograma**, o ECG (ver figura 7.4). Tres componentes del ECG representan aspectos de la función cardíaca:

1. La onda P.
2. El complejo QRS.
3. La onda T.

La onda P representa la despolarización auricular y tiene lugar cuando el impulso eléctrico viaja desde el nódulo senoauricular a través de la aurícula hasta el nódulo auriculoventricular. El complejo QRS representa una despolarización ventricular y se produce cuando el impulso se difunde desde el fascículo auriculoventricular hasta las fibras de Purkinje y a través de los ventrículos. La onda T representa la repolarización ventricular. La repolarización auricular no puede verse, ya que tiene lugar durante la despolarización ventricular (complejo QRS).



a



b

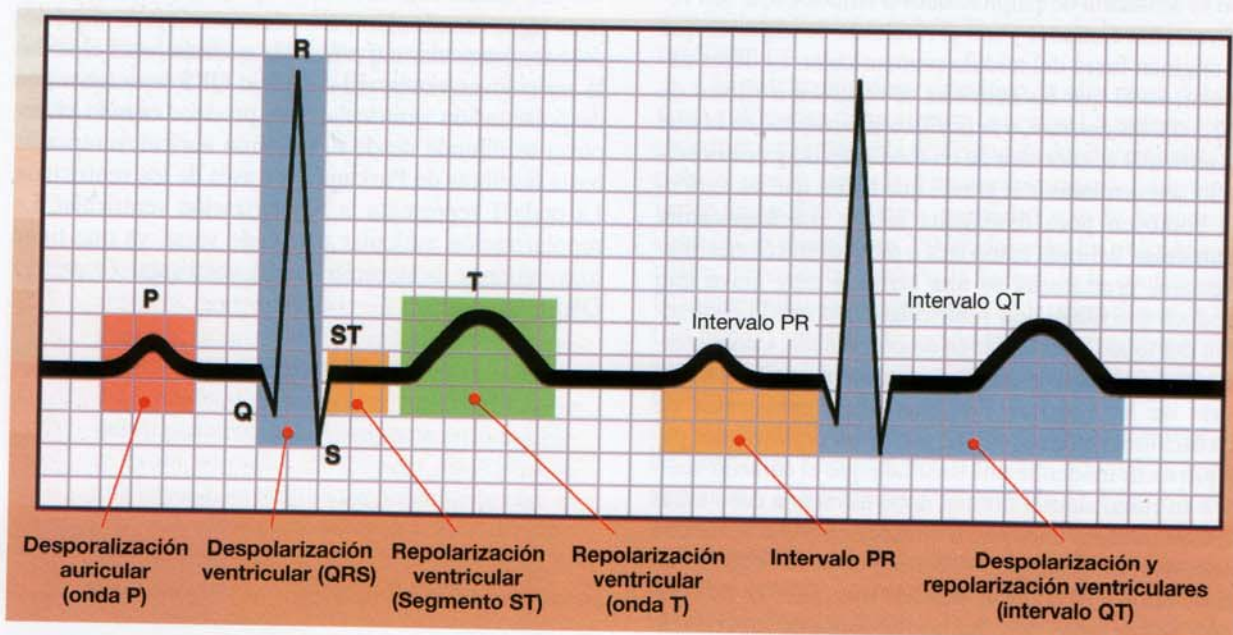


Figura 7.4 (a) Electrocardiografía de esfuerzo. Se indica al sujeto que suelte el manillar durante la prueba (una vez que mantiene el equilibrio). (b) Gráfica de las distintas fases de la electrocardiografía en reposo.

Con frecuencia se obtienen ECG de esfuerzo. Éstas son valiosas pruebas diagnósticas. Cuando la intensidad del ejercicio aumenta, el corazón debe latir más deprisa y realizar un esfuerzo más duro para aportar más sangre a los músculos activos. Si el corazón está enfermo, puede aparecer una indicación en el ECG cuando el corazón

incrementa su ritmo de trabajo. Los ECG de esfuerzo han sido también herramientas extremadamente valiosas para investigar en fisiología del esfuerzo ya que facilitan un cómodo método para rastrear los cambios cardíacos durante el ejercicio agudo y crónico.

- ▶ Las aurículas reciben sangre en el corazón; los ventrículos eyectan sangre desde el corazón.
- ▶ Puesto que el ventrículo izquierdo debe tener más potencia que las otras cámaras, su miocardio es más grueso, debido a la hipertrofia.
- ▶ El tejido cardíaco es capaz de realizar autoconducción y tiene su propio sistema de conducción. Inicia su impulso sin control neural.
- ▶ El nódulo senoauricular es el marcapasos del corazón, estableciendo el pulso y coordinando la actividad a través del corazón.
- ▶ La frecuencia cardíaca y la fuerza de la contracción pueden ser alteradas por el sistema nervioso autónomo o por el sistema endocrino.
- ▶ El ECG es un registro del funcionamiento eléctrico del corazón. Un ECG realizado durante el ejercicio puede revelar trastornos cardíacos subyacentes.

Terminología de la función cardíaca

Los términos siguientes son esenciales para comprender el esfuerzo realizado por el corazón y para nuestro futuro análisis de la respuesta cardíaca durante la actividad:

- Ciclo cardíaco.
- Volumen sistólico.
- Gasto cardíaco (\dot{Q}).

Ciclo cardíaco

El **ciclo cardíaco** incluye todos los hechos que se producen entre dos latidos cardíacos consecutivos. En términos mecánicos, consiste en que todas las cámaras del corazón pasan por una fase de relajación (diástole) y una fase de contracción (sístole). Durante la diástole, las cámaras se llenan de sangre. Durante la sístole, las cámaras se contraen y expulsan su contenido. La fase diastólica es más larga que la fase sistólica. Consideremos un individuo con una frecuencia cardíaca de 74 latidos/min. Con esta frecuencia cardíaca, todo el ciclo del corazón tarda 0,81 s en completarse (60 s/74 latidos). Del ciclo cardíaco total a este ritmo, la diástole representa 0,50 s, o el 62% del ciclo, y la sístole 0,31 s, o el 38%. Cuando la frecuencia cardíaca aumenta, estos intervalos absolutos de tiempo se reducen proporcionalmente.

Observemos el ECG normal de la figura 7.4b. Un ciclo cardíaco comprende el tiempo transcurrido entre una sístole y la siguiente. La contracción ventricular (sístole) comienza durante el complejo QRS y finaliza en la onda T. La relajación ventricular (diástole) se produce durante la onda T y continúa hasta la siguiente contracción. En esta ilustración puede verse que aunque el corazón parece estar siempre trabajando, en realidad pasa ligeramente más tiempo en la fase de reposo que en la de trabajo.

Volumen sistólico

Durante la sístole, cierto volumen de sangre es eyectado desde el ventrículo izquierdo. Esta cantidad es el **volumen sistólico (VS)** del corazón, o el volumen de sangre bombeada por cada latido (contracción). Esto se muestra en la figura 7.5a. Para entender el volumen sistólico, consideremos la cantidad de sangre en el ventrículo antes y después de la contracción. Al final de la diástole, justo antes de la contracción, el ventrículo ha completado el llenado. El volumen de la sangre que ahora contiene se denomina **volumen diastólico final** o VDF. Al final de la sístole, justo después de la contracción, el ventrículo ha completado su fase de eyección. El volumen de sangre restante en el ventrículo se denomina **volumen sistólico final** o VSF. El volumen sistólico es el volumen de sangre que ha sido eyectada, y es meramente la diferencia entre la cantidad que originariamente había y la restante después de la contracción. Así el volumen sistólico es simplemente la diferencia entre el VDF y el VSF.

Fracción de eyección

La proporción de sangre bombeada fuera del ventrículo izquierdo en cada latido es la **fracción de eyección**. Este valor, tal como se ve en la figura 7.5b, se determina dividiendo el volumen sistólico por el volumen diastólico final. Revela que parte de la sangre que entra en el ventrículo es verdaderamente eyectada durante la contracción. La fracción de eyección, expresada generalmente como un porcentaje, es de promedio de un 60% en reposo. Por lo tanto, el 60% de la sangre en los ventrículos al final de una diástole es eyectada con la siguiente contracción y el 40% restante permanece.

Producción cardíaca

El **gasto cardíaco (\dot{Q})**, tal como se muestra en la figura 7.5c, es el volumen total de sangre bombeada por los ventrículos por minuto, o simplemente el producto de la frecuencia cardíaca (FC) por el volumen sistólico (VS). El volumen sistólico en reposo en posición de pie es de promedio de 60 a 80 ml de sangre en la mayoría de adultos. Por lo tanto, con una frecuencia cardíaca en reposo de 80 latidos/min el gasto cardíaco oscilará entre 4,8 y 6,4 l/min. El cuerpo adulto medio contiene alrededor de

5 litros de sangre; por lo tanto, esto significa que toda nuestra sangre es bombeada a través del corazón una vez cada minuto.

$$VS = VDF - VSF$$

$$\text{Fracción de eyección} = (VS / VDF) \times 100\%$$

$$\dot{Q} = FC \times VS$$

La comprensión de la actividad mecánica del corazón proporciona una base para conocer el esfuerzo del sistema cardiovascular, pero el corazón es solamente una parte de este sistema. Volvamos seguidamente nuestra atención hacia el vasto sistema de vasos que llevan la sangre a todos los tejidos del cuerpo.

Sistema vascular

El sistema vascular se compone de una serie de vasos que transportan sangre del corazón a los tejidos y a la inversa:

- Arterias.
- Arteriolas.
- Capilares.
- Vénulas.
- Venas.

Recordemos que las arterias son normalmente los vasos más grandes, más musculares y más elásticos, y siempre llevan la sangre del corazón a las arteriolas. Desde éstas, la sangre entra en los capilares. Éstos son los vasos más estrechos, frecuentemente con paredes del espesor de una sola célula. Virtualmente, todos los intercambios entre la sangre y los tejidos tienen lugar en los capilares. La sangre abandona los capilares para iniciar el camino de regreso hasta el corazón en las vénulas, y de éstas a los vasos más grandes –las venas– que completan el circuito.

Además de las divisiones pulmonar y sistémica del sistema vascular, el corazón, como músculo activo, requiere su propio sistema vascular para suministrar los nutrientes necesarios y para eliminar los productos de deshecho. Las arterias coronarias, que tienen su origen en la base de la aorta cuando abandona el corazón, abastecen el miocardio. Estas arterias son muy susceptibles a la aterosclerosis, o estrechamiento, que puede hacer enfermar las arterias coronarias. Esta enfermedad se tratará con mucho mayor detalle en el capítulo 20.

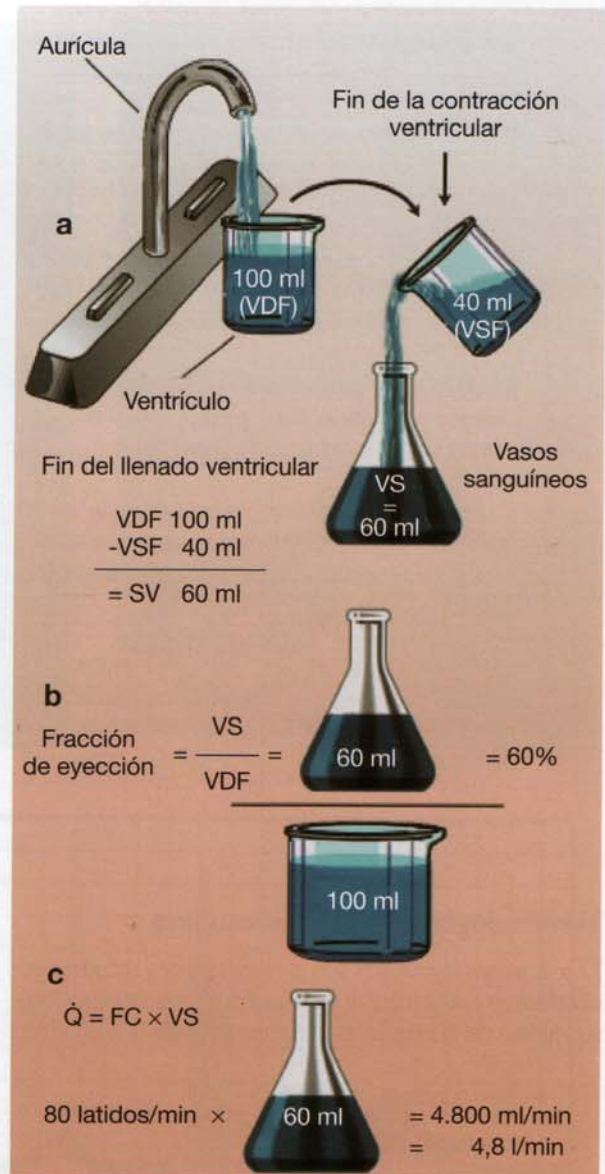


Figura 7.5 Cálculos de (a) volumen sistólico (VS), que es la diferencia entre el volumen diastólico final (VDF) y el volumen sistólico final (VSF); (b) fracción de eyección, y (c) gasto cardíaco (Q).

Durante la contracción, cuando la sangre es impulsada a abandonar el ventrículo izquierdo mediante una fuerte presión, la válvula aórtica semilunar es forzada a abrirse. Cuando esta válvula se abre, sus aletas bloquean las entradas a las arterias coronarias. Cuando la presión en la aorta disminuye, la válvula semilunar se cierra y estas entradas quedan descubiertas, por lo que la sangre puede entrar en las arterias coronarias. Este diseño asegura que dichas arterias no tengan que soportar las muy altas presiones creadas por la contracción del ventrículo

izquierdo, protegiendo de este modo a aquellos vasos de posibles daños.

Retorno sanguíneo al corazón

Debido a que pasamos tanto tiempo de pie, el sistema cardiovascular precisa una cierta ayuda para superar la fuerza de la gravedad cuando la sangre que regresa de las partes inferiores del cuerpo vuelve al corazón. Existen tres mecanismos básicos que facilitan este proceso:

1. La respiración.
2. La bomba muscular.
3. Las válvulas.

Cada vez que inspiramos y espiramos, los cambios de presión en las cavidades abdominal y torácica facilitan el retorno sanguíneo al corazón. Cuando se contraen, los músculos esqueléticos de las piernas o del abdomen comparten esta función. Durante la respiración y la contracción muscular esquelética, las venas de la zona inmediata se comprimen y la sangre es empujada hacia arriba en dirección al corazón. Estas acciones son facilitadas por una serie de válvulas en las venas que permiten que la sangre fluya en una sola dirección, impidiendo así el reflujo y la acumulación de la sangre en la parte inferior del cuerpo (ver figura 7.6).

Distribución de la sangre

La distribución de la sangre hacia los diversos tejidos del cuerpo varía tremendamente en función de las necesidades inmediatas de un tejido específico y de todo el cuerpo. En reposo bajo condiciones normales, los tejidos más activos metabólicamente reciben el mayor aporte sanguíneo. El hígado y los riñones juntos reciben casi la mitad de la sangre que circula (el 27% y el 22%, respectivamente), y los músculos esqueléticos en reposo reciben solamente alrededor del 15%.

Durante el ejercicio, la sangre se dirige hacia las áreas en donde es más necesaria. Durante la realización de ejercicios que requieren una gran capacidad de resistencia, por ejemplo, esta redistribución es bastante notable —los músculos reciben hasta un 80% o incluso más de la sangre disponible—. Esto, junto con incre-

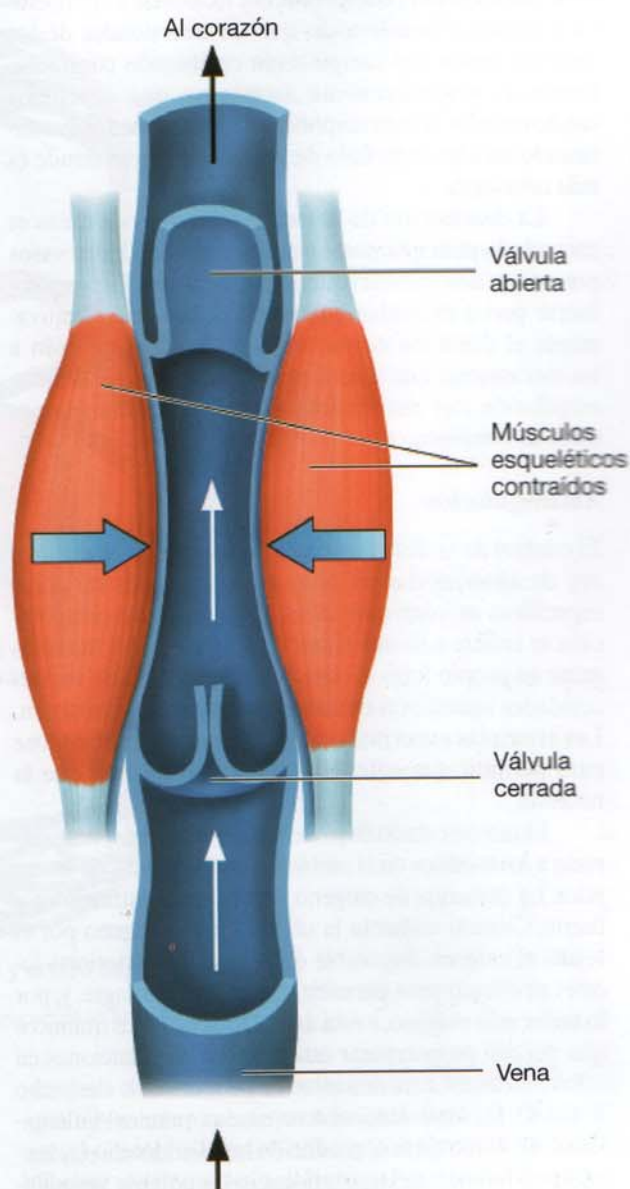


Figura 7.6 Vasoconstricción por efecto de bombeo de la musculatura. Cuando se contraen los músculos esqueléticos, comprimen las venas de las piernas y ayudan al retorno de la sangre al corazón. Las válvulas de las venas aseguran que la sangre vuelva al corazón.

mentos en el gasto cardíaco (que trataremos más adelante), permite un flujo de sangre hasta 25 veces mayor hacia los músculos activos.

Del mismo modo, después de tomar una gran comida, nuestro sistema digestivo recibe más sangre que cuando estamos en reposo. Durante una creciente tensión ambiental por el calor, el aporte de sangre a la piel

aumenta cuando el cuerpo intenta mantener la temperatura normal. Considerando que las necesidades de los diversos tejidos del cuerpo están cambiando constantemente, es verdaderamente asombroso que el sistema cardiovascular pueda responder tan eficazmente, garantizando un adecuado flujo de sangre a las áreas donde es más necesario.

La distribución de la sangre a las diversas áreas es controlada principalmente por las arteriolas. Estos vasos presentan dos características importantes. Tienen una fuerte pared muscular que puede alterar significativamente el diámetro de los vasos. Responden también a los mecanismos que controlan el flujo de sangre: la autorregulación y el control neural extrínseco. Examinemos estos mecanismos.

Autorregulación

El control de la distribución de la sangre recibe el nombre de **autorregulación** porque las arteriolas de áreas específicas se controlan ellas mismas. La autorregulación se refiere a la capacidad de los vasos para autorregular su propio flujo de sangre dependiendo de las necesidades inmediatas de los tejidos a los que abastecen. Las arteriolas experimentan vasodilatación, abriéndose para permitir que entre más sangre en un área que la necesita.

El incrementado flujo de sangre es una respuesta directa a los cambios en el ambiente químico local de los tejidos. La demanda de oxígeno parece ser el estímulo más fuerte. Cuando aumenta la utilización de oxígeno por el tejido, el oxígeno disponible disminuye. Las arteriolas locales se dilatan para permitir que pase más sangre, y, por lo tanto, más oxígeno, a esta área. Otros cambios químicos que pueden proporcionar estímulo son disminuciones en otros nutrientes e incrementos en productos de deshecho (CO_2 , K^+ , H^+ , ácido láctico) o sustancias químicas inflamatorias. El óxido nítrico, producido en el endotelio (revestimiento íntimo) de las arteriolas, es un potente vasodilatador por su acción sobre la relajación de los miocitos del músculo liso. Su papel durante el ejercicio en los seres humanos no se ha establecido con claridad, pero probablemente es importante.¹⁰ El aporte incrementado de sangre puede traer sustancias necesarias o eliminar otras perjudiciales.

Control nervioso extrínseco

Aunque el concepto de autorregulación explica la distribución local de sangre dentro de un órgano o de la masa de un tejido, no puede explicar cómo el sistema cardiovascular como un todo sabe enviar menos sangre a una parte del cuerpo cuando hace falta más en algún otro lugar. La redistribución en el sistema o a nivel del cuerpo es controlada por mecanismos neurales. Esto se conoce como **control nervioso extrínseco** del flujo sanguíneo porque el control viene desde fuera del área específica

(extrínseco) en lugar de desde dentro de los tejidos (intrínseco) como en la autorregulación.

El flujo sanguíneo a todas las partes del cuerpo se regula en gran parte por el sistema nervioso simpático. El músculo de las paredes de todos los vasos de la circulación sistémica es inervado por los nervios simpáticos. En la mayoría de los vasos, la estimulación por estos nervios hace que las células musculares se contraigan, contriñendo este vaso de modo que pueda pasar menos sangre a través de él.

Bajo condiciones normales, los nervios simpáticos transmiten impulsos continuamente a los vasos sanguíneos, manteniendo los vasos en un estado de constricción moderada para mantener una tensión arterial adecuada. Este estado de constricción parcial recibe la denominación de tono vasomotor. Cuando la estimulación simpática aumenta, una mayor constricción de los vasos sanguíneos en un área específica reduce el flujo de sangre hacia esta área y permite que vaya más sangre hacia otras partes. Pero si la estimulación simpática disminuye por debajo de lo necesario para mantener el tono, la constricción de los vasos en esta área se reduce, por lo que los vasos se dilatan, incrementando el flujo de sangre hacia esta área. En consecuencia, la estimulación simpática ocasionará vasoconstricción en la mayoría de los vasos, pero el flujo de sangre es alterado por el incremento o la reducción de la intensidad de la vasoconstricción relativa al tono vasomotor normal.

El sistema simpático también puede producir directamente vasodilatación mediante algunas de sus fibras. Un tipo diferente de fibra simpática abastece algunos vasos sanguíneos en los músculos esqueléticos y en el corazón. La estimulación de estas fibras produce vasodilatación, incrementando el flujo de la sangre hacia los músculos y el corazón. Este sistema funciona durante la clásica respuesta de "lucha o huida" e incrementa el flujo de sangre hacia los músculos esqueléticos y hacia el corazón en momentos de crisis. Esta respuesta también es activa durante el ejercicio, cuando los músculos esqueléticos y el corazón están trabajando más duro, necesitando mucha más sangre que cuando están en reposo.

Redistribución de la sangre venosa

Ahora hemos discutido los mecanismos que controlan la redistribución de la sangre desde un área del cuerpo a otra. Pero la distribución de la sangre por el cuerpo varía no solamente por los tejidos que están siendo abastecidos, sino también por la localización de la sangre en el sistema vascular. En reposo, el volumen sanguíneo se distribuye por el sistema vascular tal como se ve en la figura 7.7. La mayor parte de la sangre se localiza en los canales venosos de retorno (venas, vénulas, senos venosos). Por lo tanto, el sistema venoso proporciona una gran reserva de sangre fácilmente disponible para satisfacer las

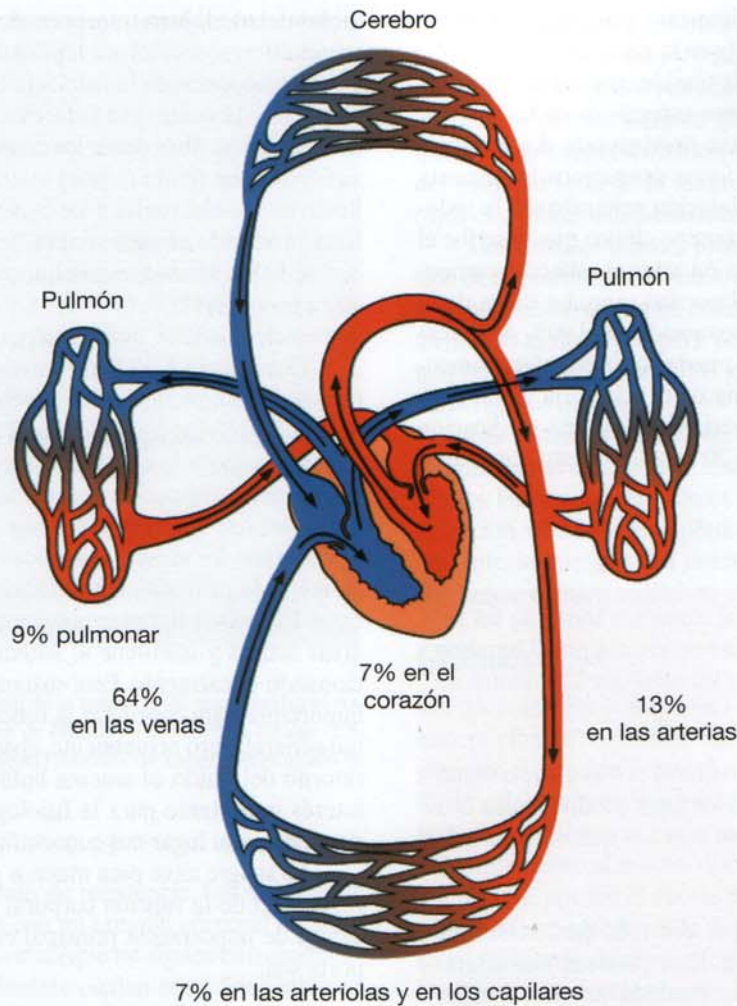


Figura 7.7 Distribución de la sangre por el sistema vascular cuando el cuerpo se halla en reposo.

necesidades aumentadas. Cuando esta necesidad se presenta, la estimulación simpática de las vénulas y de las venas constriñe estos vasos. Esto ocasiona una rápida redistribución de la sangre desde la circulación venosa periférica devolviéndola al corazón, y luego hacia aquellas áreas que tienen mayores necesidades. No solamente se desvía sangre desde otros tejidos, sino que se envía más sangre a la circulación arterial desde el sistema venoso, asegurando con ello un incremento sustancial del flujo de sangre a un área necesitada.

Tensión arterial

La tensión arterial (TA) es la presión ejercida por la sangre sobre las paredes de los vasos, y el término se refiere generalmente a la presión de la sangre en las arterias. Se expresa con dos números: la tensión arterial sistólica (TAS) y la tensión arterial diastólica (TAD). El número más elevado es la TAS de la sangre. Representa la presión más alta en la arteria y corresponde a la sístole ventricular del corazón. La contracción ventricular empuja la

sangre a través de las arterias con una fuerza tremenda, que ejerce una elevada presión sobre la pared arterial. El número más bajo es la TAD de la sangre y representa la presión más baja en las arterias, correspondiendo a la diástole ventricular cuando el corazón está en reposo. La sangre que se mueve a través de las arterias durante esta fase no es empujada por una contracción energética.

La tensión arterial media representa la presión media ejercida por la sangre cuando se mueve por las arterias. Una aproximación de la tensión arterial media es como sigue:

$$\text{Tensión arterial media} = \text{TAD} + [0,333 (\text{TAS} - \text{TAD})]$$

Como muestra, con una TAS de 120 mmHg y una TAD de 80 mmHg, la tensión arterial media = $80 + [0,333 \times (120 - 80)] = 93$ mmHg. Obsérvese que esta relación no es una simple media de los valores sistólicos y diastólicos. Recordemos que el corazón está más tiempo en diástole que en sístole, por lo que las arterias experi-

mentan presiones diastólicas más prolongadas que las sistólicas; esto se representa en la ecuación.

Las alteraciones en la tensión arterial se controlan en gran medida por cambios específicos en las arterias, arteriolas y venas descritas previamente. La constricción generalizada de los vasos sanguíneos incrementa la tensión arterial, y la dilatación generalizada la reduce. La **hipertensión** es el término clínico que describe el trastorno en el cual la tensión arterial está crónicamente por encima de su nivel normal sano. La causa de la hipertensión suele ser desconocida en el 90% de los casos, pero generalmente se puede controlar efectivamente perdiendo peso, con una dieta adecuada y con ejercicio, aunque puede requerir también una medicación apropiada. En el capítulo 20 se analiza esto con mayor detalle.

- ▶ La sangre vuelve al corazón a través de las venas, ayudada por la respiración, por el bombeo muscular y por las válvulas que hay dentro de los vasos.
- ▶ La sangre se redistribuye por el cuerpo según las necesidades de los tejidos individuales. Los tejidos más activos son los que reciben más sangre.
- ▶ La redistribución se controla localmente por la autorregulación. Ésta produce vasodilatación en respuesta a cambios químicos locales, incrementado así el aporte de sangre al área.
- ▶ El control nervioso extrínseco de la distribución lo lleva a cabo el sistema nervioso simpático, principalmente mediante la vasoconstricción (aunque tiene lugar una cierta vasodilatación en los vasos que abastecen a los músculos esqueléticos activos y al corazón).
- ▶ La tensión arterial sistólica es la más elevada dentro del sistema vascular. La tensión arterial diastólica es la presión más baja. La tensión arterial media es la presión media sobre las paredes de los vasos.

Sangre

El tercer componente de cualquier sistema de circulación es una sustancia circulante. En el cuerpo humano, se trata de la sangre y la linfa. Estos fluidos son respon-

sables del verdadero transporte de varios materiales entre las diferentes células o tejidos del cuerpo.

Recordemos de la fisiología básica la relación existente entre la sangre y la linfa: cierta cantidad del plasma de la sangre se filtra desde los capilares a los tejidos, convirtiéndose en fluido (tejido) intersticial. Gran parte del fluido intersticial vuelve a los capilares después de que se haya producido el intercambio, pero regresa menos del que se había filtrado originalmente. El exceso de fluido entra en los capilares de la linfa, y entonces recibe la denominación de linfa, que acaba por volver a la sangre.

Claramente, el sistema linfático juega un papel crucial en el mantenimiento de niveles apropiados de fluidos en los tejidos, así como en el mantenimiento de un volumen adecuado de sangre, asegurando que el fluido intersticial regrese. Esta función adquiere mayor importancia durante el ejercicio, cuando el flujo aumentado de sangre hacia los músculos activos y la tensión arterial incrementada provocan la formación de más fluido intersticial. El sistema linfático previene la tumefacción en las áreas activas y mantiene al sistema cardiovascular funcionando eficazmente. Este sistema es extremadamente importante para coordinar la función fisiológica y la salud general. Pero actualmente, aparte de su función en el retorno del fluido, el sistema linfático no es un área de interés importante para la fisiología del esfuerzo y del deporte. En su lugar nos concentraremos en la sangre.

La sangre sirve para muchos propósitos útiles en la regulación de la función corporal normal. Las tres funciones de importancia principal en el ejercicio y el deporte son:

- el transporte;
- la regulación de la temperatura, y
- el equilibrio acidobásico (pH).

Estamos muy familiarizados con las funciones de transporte de la sangre. Además, la sangre tiene una importancia crítica en la regulación de la temperatura durante la actividad física, llevando el calor desde el centro del cuerpo o desde áreas de actividad metabólica incrementada y disipándolo por el cuerpo durante la prevalencia de condiciones normales y hacia la piel cuando el cuerpo está excesivamente caliente (ver capítulo 10). La sangre puede amortiguar los ácidos producidos por el metabolismo anaeróbico, manteniendo el pH apropiado para una actividad eficaz de los procesos metabólicos (ver capítulo 8).

Volumen y composición de la sangre

El volumen total de sangre en el cuerpo varía considerablemente con el tamaño del individuo y el nivel de entrenamiento alcanzado. Los grandes volúmenes de sangre están asociados con grandes tamaños corporales y altos

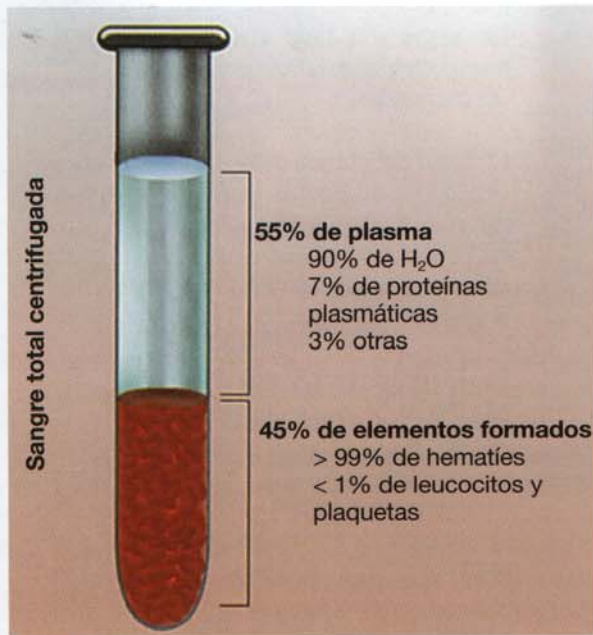


Figura 7.8 La composición de la sangre total, que muestra el volumen plasmático (porción de líquido) y el volumen celular (hematíes, leucocitos y plaquetas) después de haber centrifugado la muestra de sangre.

niveles de entrenamiento de resistencia. Los volúmenes de sangre de personas con un tamaño corporal medio y una actividad física normal (que no siguen entrenamientos aeróbicos) generalmente oscilan entre 5 y 6 litros en el caso de los hombres y entre 4 y 5 litros en el caso de las mujeres.

La sangre se compone de plasma (principalmente agua) y de células en suspensión (ver figura 7.8). El plasma normalmente constituye entre el 55% y el 60% del volumen total de la sangre, pero puede reducirse un 10% o más con ejercicios intensos realizados en un ambiente caluroso o incrementarse un 10% o más con el entrenamiento de resistencia o con la aclimatización al calor y a la humedad. Aproximadamente, el 90% del volumen del plasma es agua, un 7% son proteínas plasmáticas y el restante 3% son nutrientes celulares, electrolitos, enzimas, hormonas, anticuerpos y productos de deshecho.

La fracción corpuscular, que suele constituir aproximadamente entre el 40% y el 45% del volumen total

El hematócrito es la relación de los elementos formados en la sangre (hematíes, leucocitos y plaquetas) respecto al volumen sanguíneo total.

de la sangre, son los glóbulos rojos (eritrocitos), glóbulos blancos (leucocitos) y plaquetas (trombocitos). Los glóbulos rojos constituyen más del 99% del volumen de la fracción corpuscular; los glóbulos blancos y las plaquetas juntos representan menos del 1%. El porcentaje del volumen total de la sangre compuesto por glóbulos rojos es denominado **hematócrito**.

Los glóbulos blancos protegen el cuerpo de la invasión de organismos patógenos, destruyendo directamente a los agentes invasores mediante fagocitosis (ingestión) o formando anticuerpos para destruirlos. Los adultos tienen aproximadamente 7.000 glóbulos blancos por milímetro cúbico de sangre.

Las restantes células son las plaquetas. En realidad no son células en absoluto, sino más bien fragmentos de células. Estos pequeños discos son necesarios para la coagulación, que impide la pérdida excesiva de sangre. No obstante, lo que más nos interesa son los glóbulos rojos, por lo que nuestro análisis se centrará en ellos.

Glóbulos rojos

Los glóbulos rojos maduros (eritrocitos) no tienen núcleo, por lo que no pueden reproducirse. Deben ser reemplazados por nuevas células. La duración normal de la vida de un glóbulo rojo es tan sólo de unos 4 meses. Por lo tanto, estas células se están produciendo y destruyendo constantemente al mismo ritmo. Este equilibrio es muy importante, porque el aporte adecuado de oxígeno a los tejidos del cuerpo depende de que se disponga de un número suficiente de elementos de transporte —los glóbulos rojos—. Las disminuciones en su número o en su función pueden dificultar el aporte de oxígeno y afectar, por lo tanto, el rendimiento.

Los glóbulos rojos pueden ser destruidos durante el ejercicio. La membrana celular parece verse alterada por el desgaste y el desgarro asociados con un ritmo de circulación incrementado y con una mayor temperatura corporal. Hay incluso estudios que han demostrado que el constante golpeteo de la planta de un pie contra el zapato durante las carreras de fondo puede aumentar la fragilidad y la destrucción de los glóbulos rojos.

Los glóbulos rojos transportan oxígeno principalmente unido a su hemoglobina. La **hemoglobina** se compone de una proteína (globina) y un pigmento (hem). Hem contiene hierro, que se combina con el oxígeno. Cada glóbulo rojo contiene aproximadamente 250 millones de moléculas de hemoglobina, y cada una de ellas es capaz de unirse con 4 moléculas de oxígeno, por lo que cada glóbulo rojo puede unirse con hasta un billón de moléculas de oxígeno. Hay un promedio de 15 g de hemoglobina por cada 100 ml de sangre completa. Cada gramo de hemoglobina puede combinarse con 1,33 ml de oxígeno, por lo que puede haber hasta 20 ml de oxígeno en cada 100 ml de sangre.

Viscosidad de la sangre

La viscosidad se refiere al espesor de la sangre. Cuanto más espeso es un fluido, más resistencia opone a la circulación. La densidad de la sangre suele ser el doble de la del agua. La viscosidad de la sangre, y, por lo tanto, la resistencia a fluir, se incrementa con la elevación del hematócrito.

Debido al transporte de oxígeno por los glóbulos rojos, sería deseable un incremento en su número para optimizar el transporte de oxígeno. Pero si el aumento del número de glóbulos rojos no va acompañado de un incremento similar en el volumen del plasma, la viscosidad de la sangre aumentará, lo cual puede restringir el flujo sanguíneo. En general, esto no es un problema, a menos que el hematócrito llegue al 60% o más.

A la inversa, la combinación de un hematócrito bajo con un alto volumen de plasma, reduciendo la viscosidad de la sangre, parece ser algo beneficiosa para la función de transporte de la sangre porque ésta puede fluir más fácilmente. Desgraciadamente, un hematócrito bajo es con frecuencia el resultado de un número reducido de glóbulos rojos, como en enfermedades tales como la anemia. Bajo estas circunstancias, la sangre puede fluir fácilmente, pero contiene menos transportadores, por lo que el transporte de oxígeno se ve dificultado. Para la actividad física, es deseable un bajo hematócrito con un número normal o ligeramente elevado de glóbulos rojos. Esta combinación debe facilitar el transporte de oxígeno. Muchos deportistas de deportes de resistencia alcanzan esta condición como parte de la adaptación normal de su sistema cardiovascular. Esto se verá en el capítulo 9.

Al donar sangre, la extracción de una unidad, casi 500 ml, representa aproximadamente entre un 8% y un 10% de reducción en el volumen total de sangre y en el número de glóbulos rojos circulantes. A los donantes se les aconseja tomar fluidos en abundancia. Puesto que el plasma es principalmente agua, el simple reemplazo de los fluidos vuelve el volumen del plasma a su nivel normal al cabo de 24 a 48 horas. No obstante, se necesitarán al menos 6 semanas para reconstituir el número de glóbulos rojos, ya que deben desarrollarse plenamente antes de que resulten funcionales. Esto pone gravemente en entredicho el rendimiento de los deportistas de resistencia al reducir la capacidad de transporte de oxígeno.

- ▶ La sangre y la linfa son las sustancias que transportan materiales hacia y desde los tejidos corporales.
- ▶ El fluido del plasma entra en los tejidos, convirtiéndose en líquido intersticial. La mayor parte del fluido intersticial vuelve a los capilares, pero cierta cantidad entra en el sistema linfático como linfa, volviendo posteriormente a la sangre.
- ▶ La sangre está constituida por entre un 55% y un 60% de plasma y entre un 40% y un 45% de células.
- ▶ El oxígeno se transporta principalmente combinado con la hemoglobina de los glóbulos rojos.
- ▶ Cuando la viscosidad de la sangre aumenta, también lo hace la resistencia a fluir.

Respuesta cardiovascular al ejercicio

Ahora que hemos visto la anatomía y la fisiología básicas del sistema cardiovascular, podemos centrarnos específicamente en cómo responde este sistema a las mayores demandas impuestas al cuerpo durante el ejercicio. Al realizar ejercicio, la demanda de oxígeno en los músculos activos aumenta de forma acusada. Se utilizan más nutrientes. Los procesos metabólicos se aceleran, por lo que se crean más productos de deshecho. Durante la realización de ejercicios prolongados o practicados en un ambiente caluroso, la temperatura del cuerpo aumenta. En el ejercicio intenso, la concentración de cationes hidrógeno (H^+) aumenta en los músculos y en la sangre, reduciendo su pH.

Durante el ejercicio se producen numerosos cambios cardiovasculares. Todos comparten un objetivo común: permitir que el sistema satisfaga las demandas impuestas sobre él al desempeñar sus funciones con la máxima eficacia. Para comprender mejor los cambios que se producen, debemos observar más de cerca las funciones cardiovasculares específicas. Examinaremos los cambios en todos los componentes del sistema cardiovascular, observando específicamente los siguientes:

- Frecuencia cardíaca.
- Volumen sistólico.

- Gasto cardíaco.
- Flujo de la sangre.
- Tensión arterial.
- Sangre.

Luego veremos la forma en que se integran estos cambios para cubrir las necesidades del cuerpo.

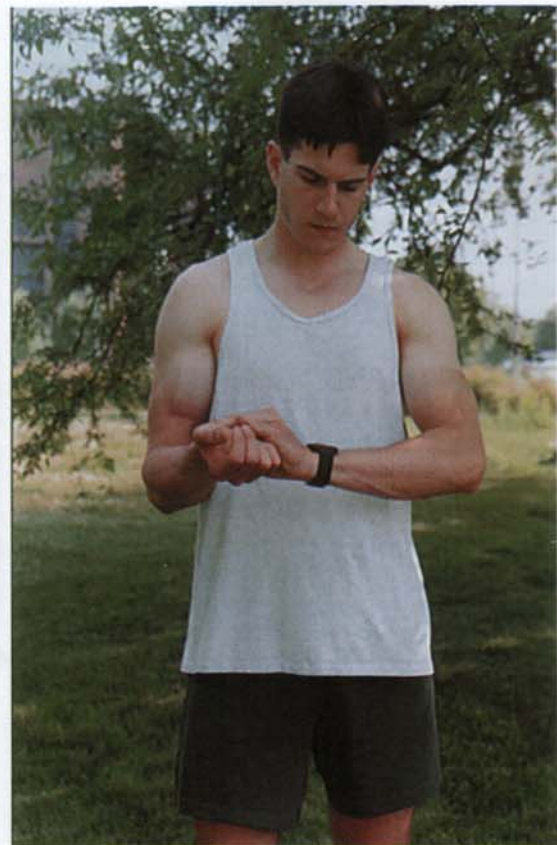
Frecuencia cardíaca

La frecuencia cardíaca (FC) es uno de los parámetros cardiovasculares más sencillos e informativos. Medirla implica simplemente tomar el pulso del sujeto, normalmente en el punto radial o carotídeo, tal como se muestra en la figura 7.9. La frecuencia cardíaca refleja la intensidad del esfuerzo que debe hacer el corazón para satisfacer las demandas incrementadas del cuerpo cuando está inmerso en una actividad. Para entender esto, debemos comparar la frecuencia cardíaca en reposo y durante el ejercicio.

Frecuencia cardíaca en reposo

La frecuencia cardíaca **en reposo** de promedio es de 60 a 80 latidos/min. En individuos sedentarios, desentrenados y de mediana edad, el ritmo en reposo puede superar los 100 latidos/min. En deportistas muy en forma que siguen entrenamientos de resistencia, se han descrito frecuencias en reposo que oscilan entre 28 y 40 latidos/min. La frecuencia cardíaca normalmente decrece con la edad. Se ve afectada también por factores ambientales; por ejemplo, aumenta con la temperatura y la altitud.

Antes del inicio del ejercicio, nuestra frecuencia cardíaca previa al ejercicio suele aumentar muy por encima de los valores normales de reposo. Esto se denomina respuesta anticipatoria. Esta respuesta es mediada por la liberación del neurotransmisor noradrenalina desde el sistema nervioso simpático, y la hormona adrenalina desde la glándula suprarrenal. El tono vagal probablemente también se reduce. Puesto que la frecuencia cardíaca previa al ejercicio es elevada, las estimaciones fiables de la verdadera frecuencia cardíaca en reposo deben hacerse solamente bajo condiciones de total relajación, tales como a primeras horas de la mañana al levantarse después de un sueño reparador durante la noche. La frecuencia cardíaca previa al ejercicio no debe usarse como estimación de la frecuencia cardíaca en reposo.



a



b

Figura 7.9 Procedimiento para tomar (a) el pulso radial y (b) el pulso carotídeo.

Frecuencia cardíaca durante el ejercicio

Cuando se empieza a hacer ejercicio, la frecuencia cardíaca aumenta directamente en proporción al incremento de la intensidad del ejercicio (ver figura 7.10) hasta llegar a un punto cercano al agotamiento. Al aproximarse a este punto, la frecuencia cardíaca empieza a nivelarse. Esto muestra que nos acercamos al valor máximo. La **frecuencia cardíaca máxima** (FC máx.) es el valor máximo de la frecuencia cardíaca que se alcanza en un esfuerzo a tope hasta llegar al agotamiento. Es un valor muy fiable que se mantiene constante de un día para otro y sólo cambia ligeramente de año en año.

La frecuencia cardíaca máxima se calcula basándose en la edad, porque la frecuencia cardíaca máxima muestra un declive ligero pero regular de un latido por año comenzando de los 10 a los 15 años de edad. Se resta la edad a 220 y se obtiene una aproximación de la media de la frecuencia cardíaca máxima. No obstante, es sólo una aproximación; los valores individuales cambian considerablemente. Veamos un ejemplo, para una persona de 40 años de edad; la frecuencia cardíaca máxima sería unos 180 latidos/min (FC máx. = 220 - 40). Sin embargo, el 68% de las personas de 40 años presentan valores reales de su frecuencia cardíaca máxima entre 168 y 192 latidos/min (media ± 1 desviación estándar), y un 95% está entre 156 y 204 latidos/min (media ± 2 desviaciones estándar). Esto muestra el riesgo potencial de error al calcular la frecuencia cardíaca máxima de una persona.

Para calcular la frecuencia cardíaca máxima:

$$FC \text{ máx.} = 220 - \text{edad en años}$$

Estado estable de la frecuencia cardíaca

Cuando el ritmo de esfuerzo se mantiene constante a niveles submáximos de ejercicio, la frecuencia cardíaca se incrementa muy rápidamente hasta llegar a estabilizarse. Este punto de estabilización es conocido como el **estado estable de la frecuencia cardíaca**, y es el ritmo óptimo del corazón para satisfacer las exigencias circulatorias a este ritmo específico de esfuerzo. Para cada incremento posterior de intensidad, la frecuencia cardíaca

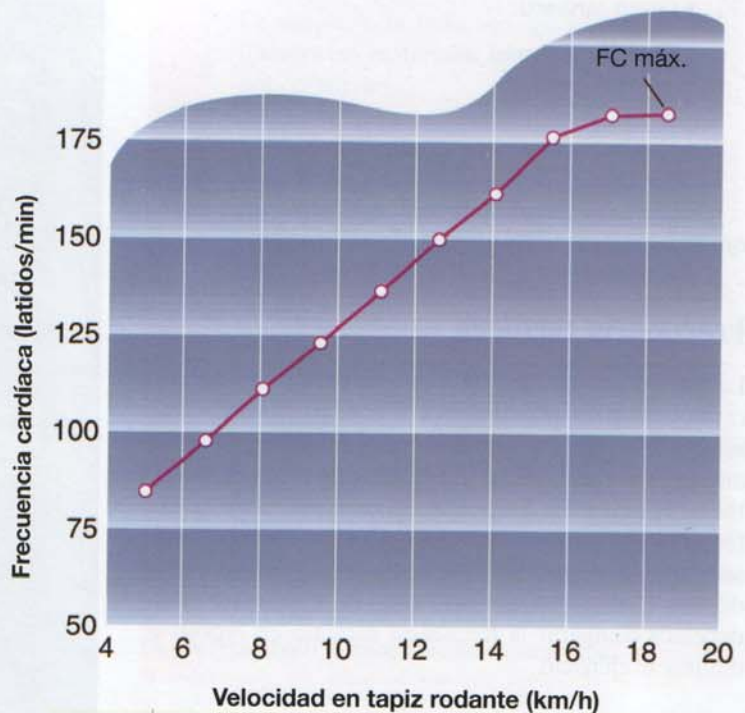


Figura 7.10 Cambios en la frecuencia cardíaca al caminar, trotar y correr aumentando la velocidad en un tapiz rodante. La frecuencia cardíaca aumenta en proporción directa al aumento de la velocidad, llegando finalmente a la frecuencia cardíaca máxima (FC máx.)

alcanzará un nuevo valor estable al cabo de 1 ó 2 min. No obstante, cuanto más intenso es el ejercicio, más se tarda en alcanzar este estado estable.

El concepto de frecuencia cardíaca estable constituye la base de varias pruebas que se han desarrollado para estimar el nivel de *fitness*. En una de estas pruebas, a los individuos se les sitúa en un dispositivo para hacer ejercicio, como por ejemplo un cicloergómetro, y se les hace ejercitarse a dos o tres ritmos de esfuerzo distintos. Los que están en mejores condiciones físicas, basándose en su resistencia cardiorrespiratoria, tendrán estados estables más bajos de la frecuencia cardíaca a un ritmo determinado de esfuerzo que quienes no están en tan buena forma. Por lo tanto, la frecuencia cardíaca estable es un pronosticador válido de la eficacia del corazón —una frecuencia cardíaca menor refleja un corazón más eficaz—.

Cuando el ejercicio se ejecuta a un ritmo constante durante un período prolongado de tiempo, particularmente bajo condiciones de calor, la frecuencia cardíaca tiende a aumentar en lugar de mantener su valor estable. Esta respuesta es parte de un fenómeno llamado desplazamiento cardiovascular (tratado más adelante en este capítulo).