



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

Facultad de Odontología



# Apuntes

## Aparato circulatorio



Estudios Profesionales: Licenciatura de Cirujano Dentista

Unidad de Aprendizaje: Semiología II

Carga académica:	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>8</b>
	Horas Teóricas	Horas prácticas	Total de horas	Créditos

Carácter: **Obligatoria**      Tipo: **Curso Taller**      Periodo escolar: **Quinto**

Núcleo de formación: **Sustantivo**

***Dra. María Elena V. Escalona Franco***

2025

# Contenido

Contenido .....	2
1. Características funcionales del aparato circulatorio .....	6
1.1 Organización general del aparato circulatorio .....	6
1.1.1 El corazón .....	6
1.1.2 Sistema vascular .....	7
2. Propiedades eléctricas del corazón .....	9
2.1 Introducción.....	9
2.2 Histología cardíaca.....	10
2.2.1 Miocardiocito o fibra muscular cardíaca.....	10
2.3 Funcionamiento del corazón .....	12
2.3.1 Propiedades eléctricas del corazón .....	12
Sistema eléctrico del corazón.....	13
2.3.2 Potencial de acción cardíaco.....	14
2.3.2.1 Potencial marcapasos o respuesta lenta.....	15
2.3.2.2 Potencial de acción ventricular o respuesta rápida .....	16
2.3.2.3 Periodo refractario.....	16
2.3.2.4 Propagación del potencial de acción cardíaco.....	17
3. Mecánica cardíaca: el ciclo cardíaco .....	18
3.1 Propiedades mecánicas de la actividad contráctil de la fibra cardíaca .....	18
3.1.1 Acoplamiento excitación-contracción.....	18
3.1.3 Propiedades mecánicas .....	18
3.2 Ciclo cardíaco.....	19
3.2.1 Fases del ciclo cardíaco.....	20
3.2.2 Curva presión-volumen o trabajo cardíaco.....	20
4. Gasto cardíaco o volumen minuto.....	22
4.1 Regulación del gasto cardíaco.....	22
4.1.1 Regulación de la frecuencia (efectos cronotrópicos).....	22
4.1.2 Regulación del volumen sistólico (efectos inotrópicos) .....	24
4.1.3 Regulación intrínseca del volumen sistólico. Mecanismo de Frank-Starling.....	24
4.1.4 Regulación extrínseca del volumen sistólico.....	25
5. Hemodinámica o física del flujo sanguíneo .....	25
5.1 Tipos de flujo .....	27

5.1.1 Flujo laminar .....	27
5.1.2 Flujo turbulento .....	27
5.2 Resistencias vasculares .....	28
5.2.1 Tipos de resistencia.....	28
5.2.2 Viscosidad .....	28
5.3 Relaciones entre el flujo, la presión y la resistencia. Ley de Poiseuille .....	30
5.4 Propiedades de la pared vascular .....	31
5.4.1 Relación presión-volumen o estudio de la complianza.....	31
5.5 Relaciones entre las variables hemodinámicas.....	32
6. Circulación arterial. Presión arterial .....	32
6.1 Sistema arterial. Características generales .....	32
6.1.1 Estructura de las paredes arteriales .....	32
6.1.2 Clasificación de las arterias .....	33
6.1.3 Funciones principales de las arterias .....	34
6.2 Presión arterial.....	35
2.1 Medida de la presión arterial.....	36
6.2.2 Factores determinantes de la presión arterial media .....	39
6.3 Pulso arterial. Presión de pulso .....	39
6.3.1 Transmisión de la onda de pulso .....	39
7. Circulación capilar.....	40
7.1 Estructura y tipos de vasos capilares .....	40
7.1.1 Estructura de la pared capilar .....	41
7.2 Intercambio a nivel capilar.....	42
7.2.1 Tipos de intercambio entre capilares y líquido intersticial.....	42
7.2.2 Equilibrio de Starling.....	43
8. Circulación venosa y linfática.....	46
8.1 Circulación venosa .....	46
8.1.1 Estructura y funciones de las venas .....	46
8.1.2 Diferencias con el sistema arterial .....	47
8.1.3 Estudio de la distensibilidad venosa: relación presión-volumen en el sistema venoso ....	47
8.1.4 Tipo y velocidad de flujo en el sistema venoso.....	48
8.2 Pulso venoso.....	48
8.3 Presión venosa.....	48

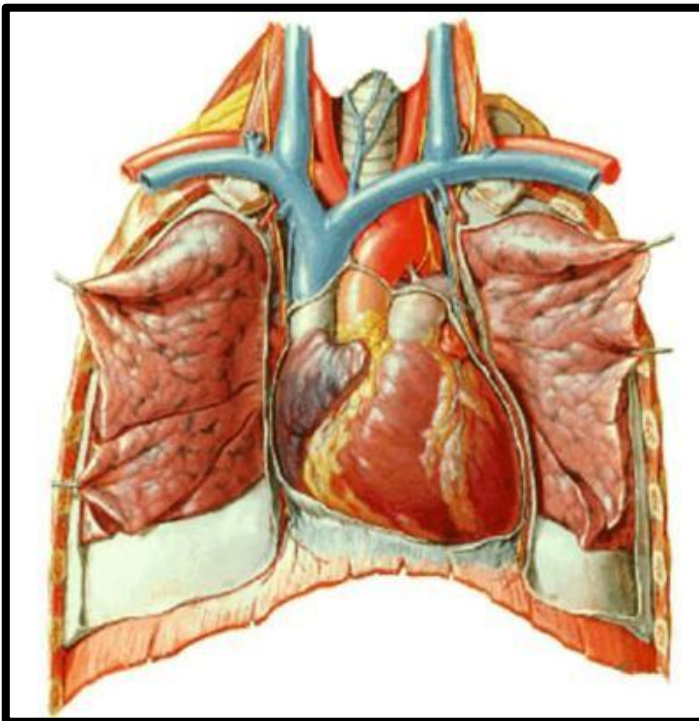
8.3.1 Presión venosa central.....	49
8.3.2 Presión venosa periférica.....	49
8.3.3 Efecto de la gravedad sobre la presión venosa .....	50
8.3.4 Valoración de la presión venosa .....	51
8.4 Retorno venoso.....	51
8.4.1 Fuerzas responsables del retorno venoso.....	51
8.4.2 Bomba muscular .....	51
8.4.3 Bomba respiratoria .....	52
8.4.4 Bomba cardíaca .....	53
8.5 Circulación linfática.....	53
8.5.1 Estructura y función de los vasos linfáticos .....	53
8.5.2 Formación de la linfa .....	54
8.5.3 Flujo linfático .....	54
9. Regulación del aparato circulatorio .....	55
9.1 Esquema General.....	55
9.2 Mecanismo de control humoral y nervioso del flujo sanguíneo.....	56
9.2.1.1 Sustancias vasoconstrictoras .....	57
9.2.1.2 Sustancias vasodilatadoras .....	57
9.2.2 Control nervioso .....	58
9.2.2.1 Tono miogénico o basal .....	58
9.3 Tipos de regulación.....	59
9.3.1 Regulación local.....	59
9.3.1.1 Regulación local a corto plazo: efecto del metabolismo tisular.....	59
9.3.1.2 Regulación local a largo plazo.....	60
9.3.2 Regulación central .....	60
9.3.2.1 Mecanismo de regulación central a corto plazo: reflejos de mantenimiento de la tensión arterial .....	60
9.3.2.2 Regulación central a medio y largo plazo.....	63
Tema 1. Composición y funciones de la sangre .....	63
1.1 Funciones específicas de la sangre .....	63
1.2 Características y composición de la sangre.....	64
1.3 Estudio del plasma.....	65
1.4 Proteínas plasmáticas .....	66

1.4.1	Funciones de las proteínas plasmáticas .....	66
1.4.2	Características y funciones de las más importantes.....	66
Tema 2.	Glóbulos rojos, eritrocitos o hematíes .....	67
2.1	Características.....	67
2.2	Eritropoyesis .....	68
2.2.1	Regulación de la eritropoyesis .....	69
2.3	Función de los eritrocitos .....	69
2.4	Estudio de la hemoglobina .....	70
2.4.1	Cantidad de hemoglobina .....	70
2.4.3	Función de la hemoglobina.....	70
2.5	Metabolismo del hierro .....	71
2.6	Función del bazo.....	71
2.7	Determinaciones de interés clínico.....	71
Tema 3.	Grupos sanguíneos.....	72
3.1	Principios fisiológicos.....	72
3.1.1	Sistema ABO .....	73
3.1.2	Sistema Rh .....	74
Tema 4.	Hemostasia: plaquetas .....	74
4.1	Plaquetas .....	74
4.1.1	Trombopoyesis .....	76
4.2	Hemostasia .....	76
4.2.1	Hemostasia primaria.....	76
4.2.1.1	Adhesión o adherencia plaquetaria.....	76
4.2.1.2	Secreción y agregación plaquetaria .....	76
4.2.2	Hemostasia secundaria o coagulación.....	77
4.2.2.1	Formación de protrombinasa .....	77
4.2.2.2	Formación de trombina .....	78
4.2.2.3	En la sangre se encuentra presente una proteína inactiva, el Factor I o fibrinógeno .....	78
4.2.3	Fibrinolisis o resolución tras la coagulación .....	78
4.2.4	Sistemas anticoagulantes.....	79
Referencias	.....	79

## 1. Características funcionales del aparato circulatorio

*El aparato circulatorio, compuesto por el corazón, los vasos sanguíneos y la sangre, tiene varias características funcionales que le permiten llevar a cabo sus principales funciones en el organismo. Algunas de estas características son: 1. Circulación cerrada: El aparato circulatorio humano tiene una circulación cerrada, lo que significa que la sangre circula continuamente dentro de un sistema de vasos sanguíneos. La sangre se bombea desde el corazón hacia los vasos sanguíneos arteriales, luego pasa a través de los capilares donde ocurre el intercambio de nutrientes y gases con los tejidos, y finalmente regresa al corazón a través de los vasos sanguíneos venosos. Su función es: transportar nutrientes a las células de los tejidos; transportar productos de desecho metabólicos; participar en mecanismos homeostáticos como la regulación de la temperatura, regulación del equilibrio hídrico, etc.; participación en la defensa y comunicación en el organismo, transportando células y moléculas de defensa y hormonas y participar en la reproducción al proporcionar el mecanismo de erección del pene. Estas importantes funciones se llevan a cabo por las dos piezas que componen este aparato: el corazón, que actúa como bomba impelente-aspirante, y una red de distribución constituida por los vasos sanguíneos.*

### 1.1 Organización general del aparato circulatorio



Fuente: [1https://www.auladeanatomia.com/upload/htmleditor/Nova-Imagem-2.jpg](https://www.auladeanatomia.com/upload/htmleditor/Nova-Imagem-2.jpg)

#### 1.1.1 El corazón

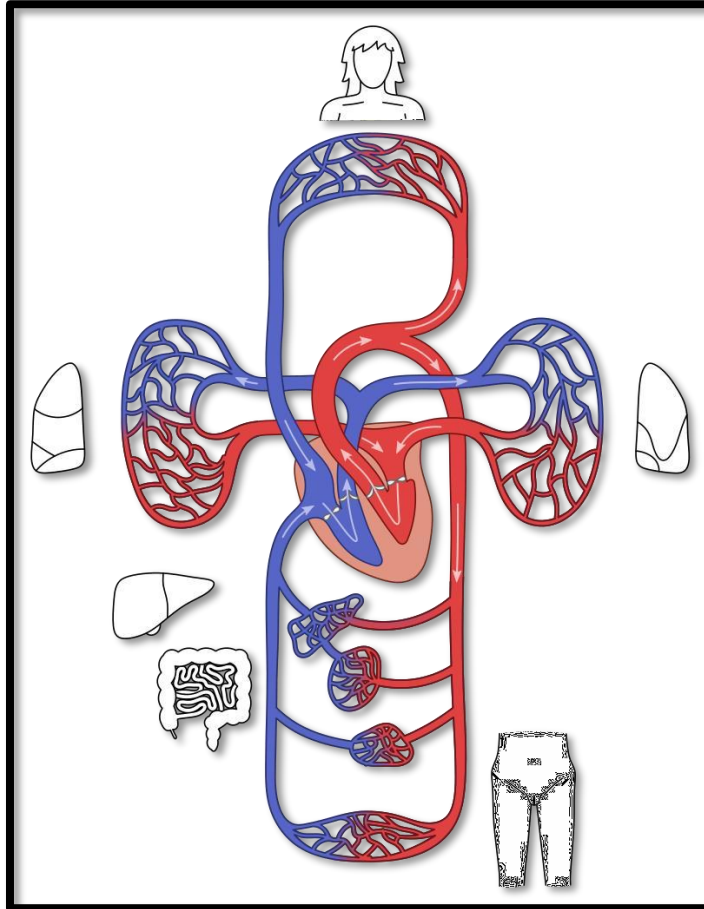
*El corazón es un órgano muscular (miocardio) situado en el centro del pecho, ligeramente desplazado hacia la izquierda, cubierto en parte por los pulmones, Tiene forma de cono y aproximadamente del tamaño de un puño cerrado, tiene como misión impulsar la sangre para ser distribuida a los tejidos. El corazón consta de cuatro cavidades cardíacas: dos aurículas en la parte superior y dos ventrículos en la parte inferior separadas por un tabique muscular, y a su vez las aurículas están separadas de*

*los ventrículos por un plano valvular: las válvulas aurículoventriculares. Las aurículas (aurícula derecha y aurícula izquierda) reciben la sangre que regresa de la circulación, mientras que los ventrículos (ventrículo derecho y ventrículo izquierdo) bombean la sangre fuera del corazón hacia la circulación*

*La sangre venosa procedente de la circulación de todo el cuerpo vuelve al corazón por las venas cavas superior e inferior entrando por la aurícula derecha (AD). Por la vena cava superior ingresa la sangre que procede de la cabeza y los brazos y por la cava inferior la sangre que proviene del abdomen y las piernas. Esta sangre es pobre en oxígeno pues ha dejado parte de él en el organismo. Desde la aurícula, a través de una válvula (tricúspide) la sangre pasa a otra cámara del corazón, el ventrículo derecho (VD) y de aquí, a través de la válvula pulmonar, por la arteria pulmonar llega a los pulmones, donde se carga de oxígeno que tomamos en la respiración. La sangre, ya oxigenada, vuelve al corazón, a la aurícula izquierda (AI), por las venas pulmonares (dos izquierdas y dos derechas). Desde aquí, pasando por la válvula mitral, llega al ventrículo izquierdo (VI), que es el principal motor impulsor de la sangre hacia el resto del cuerpo, desde donde, a través de la válvula aórtica sale la sangre oxigenada para ser distribuida a los diferentes órganos. La función de las válvulas aurículoventriculares es la de evitar el reflujo hacia las aurículas cuando se produce la sístole ventricular. Las válvulas semilunares (aórtica y pulmonar) realizan la misma función entre las arterias aorta y pulmonar y ventrículos en la diástole. La unidireccionalidad sanguínea se debe al sistema de válvulas. El corazón está envuelto por el pericardio que forma una cavidad membranosa en la que hay una pequeña cantidad de líquido (líquido pericárdico) que sirve de lubricante y amortiguador de los movimientos cardiacos. Esta superficie pericárdica tiene una parte de la membrana que envuelve el corazón (pericardio visceral), para luego hacer un repliegue formando el pericardio parietal. El pericardio además de facilitar la movilidad del corazón actúa como sistema de control limitante para la distensión cardiaca que se produce con el llenado sanguíneo.*

### **1.1.2 Sistema vascular**

*Se distinguen dos circuitos, la circulación pulmonar, que va desde el VD hasta la AI pasando por el pulmón para oxigenar la sangre, y la circulación sistémica que se inicia en el VI y finaliza en la AD y distribuye la sangre al resto de los órganos del cuerpo.*

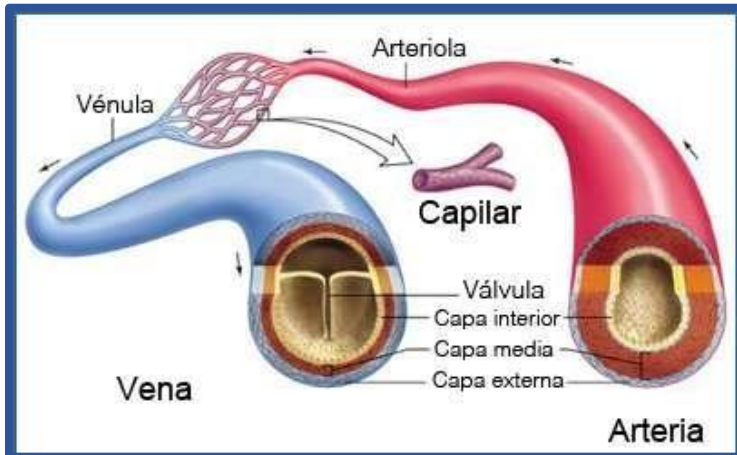


Fuente:  
[2https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/bd/Human\\_circulatory\\_system.svg/800px-Human\\_circulatory\\_system.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/bd/Human_circulatory_system.svg/800px-Human_circulatory_system.svg.png)

Desde el corazón (VI) la sangre sale por la arteria aorta que se va dividiendo en arterias más pequeñas hasta llegar a arterias microscópicas llamadas arteriolas, que son vasos de resistencia responsables de regular el flujo sanguíneo. Estas terminan en unos vasos muy finos llamados capilares, vasos de intercambio, que forman como una extensa red de distribución para todos los tejidos corporales. La sangre es recogida de los tejidos mediante los capilares venosos, red que va confluyendo en vasos venosos cada vez mayores constituyendo las vénulas, la confluencia de éstas, da lugar a venas mayores hasta formar las venas cava superior e inferior que conducen la sangre a la aurícula derecha del corazón. Las paredes de los vasos (arteria, arteriolas, capilares, vénulas y venas) esencialmente tienen la misma constitución:

1. *Túnica íntima, constituida por células endoteliales, en contacto con la sangre.*
2. *Túnica media, formada por tejido muscular que contiene elastina y fibras de colágeno, y está rodeada en ambas caras por tejido elástico.*

3. *Túnica adventicia, capa de tejido conectivo, que tiene la misión de fijar el vaso sanguíneo en su sitio. Estos vasos se diferencian en el porcentaje de cada uno de los componentes, lo que proporciona las características particulares de funcionamiento a los diferentes vasos sanguíneos.*



Fuente:

[3https://www.cebanatural.com/images/news/blog\\_estructura\\_vasos.jpg](https://www.cebanatural.com/images/news/blog_estructura_vasos.jpg)

*La pared arterial tiene gran cantidad de tejido elástico y muscular liso, lo que permite a la arteria cambiar su calibre (dilatarse y contraerse) adaptándose a la cantidad de sangre que transporta y facilitando la*

*impulsión del bolo sanguíneo. Las arteriolas por su parte, a diferencia del resto de las arterias, tienen mayor proporción de tejido muscular y por ello se contraen o se dilatan más intensamente regulando el flujo de sangre. Los capilares no tienen células musculares y su pared está compuesta solamente por el endotelio con una sola capa de células planas, rodeada por la membrana basal sobre la cual se sustentan. En general, la pared capilar es permeable dado que sus células tienen pequeños poros. Las venas se caracterizan por tener paredes finas, pero con células musculares que les permite aumentar o disminuir su calibre. Al ser poco consistentes, sus paredes se colapsan si están vacías, aunque también pueden dilatarse mucho y aumentar su volumen varias veces, actuando como reservorio sanguíneo.*

*La pared arterial tiene gran cantidad de tejido elástico y muscular liso, lo que permite a la arteria cambiar su calibre (dilatarse y contraerse) adaptándose a la cantidad de sangre que transporta y facilitando la impulsión del bolo sanguíneo. Las arteriolas por su parte, a diferencia del resto de las arterias, tienen mayor proporción de tejido muscular y por ello se contraen o se dilatan más intensamente regulando el flujo de sangre. Los capilares no tienen células musculares y su pared está compuesta solamente por el endotelio con una sola capa de células planas, rodeada por la membrana basal sobre la cual se sustentan. En general, la pared capilar es permeable dado que sus células tienen pequeños poros. Las venas se caracterizan por tener paredes finas, pero con células musculares que les permite aumentar o disminuir su calibre. Al ser poco consistentes, sus paredes se colapsan si están vacías, aunque también pueden dilatarse mucho y aumentar su volumen varias veces, actuando como reservorio sanguíneo.*

## **2. Propiedades eléctricas del corazón**

### **2.1 Introducción**

*El sistema cardiovascular o aparato circulatorio está formado por el corazón y los vasos sanguíneos. Su función es llevar a cabo la circulación de la sangre por todo el organismo, para distribuir el oxígeno y demás nutrientes a las células del organismo, y recoger sus productos metabólicos de desecho para su eliminación.*

*La importancia de este sistema en un organismo pluricelular radica en que constituye el nexo de comunicación entre las células y el medio externo, distribuyendo sustancias que son esenciales para el metabolismo y la supervivencia celular.*

*La bomba cardiaca está formada por cuatro cavidades (dos aurículas y dos ventrículos) que funcionan como dos bombas en serie, trabajando al unísono y manteniendo cada una de ellas un circuito. El corazón derecho, junto con las arterias, capilares y venas pulmonares, forman el circuito menor o circulación pulmonar; mientras que el corazón izquierdo, junto con las arterias, capilares y venas sistémicas forman el circuito mayor o circulación sistémica.*

*El movimiento de la sangre en este sistema cerrado sería:*

- a) Tomando como punto de inicio el ventrículo izquierdo, recorrería todos los vasos sistémicos hasta volver a la aurícula derecha.*
- b) Pasa al ventrículo derecho que la bombea a los vasos pulmonares, retornando a la aurícula izquierda para pasar al ventrículo y cerrar de esta forma todo el circuito.*

## **2.2 Histología cardiaca**

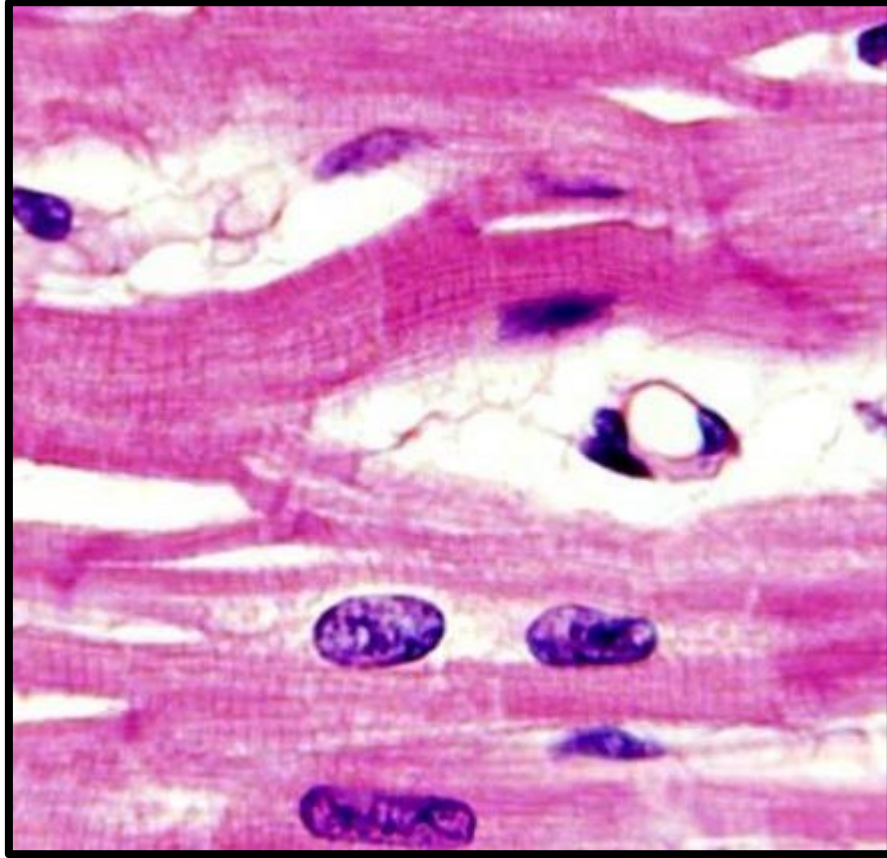
*a pared cardiaca, al igual que la pared vascular, está formada por tres capas de tejidos. La más interna recibe el nombre de endocardio y es una capa de células epiteliales muy planas con uniones muy fuertes entre ellas, y en contacto continuo con la sangre.*

*La capa media es la más importante y se denomina miocardio, está formada por fibras musculares estriadas cardíacas que superficialmente se disponen de forma oblicua, en la porción central del miocardio adoptan una disposición circular y las más profundas se sitúan longitudinalmente. Su contracción garantiza un acortamiento en todos los ejes del espacio y justifica la función de bomba que tiene esta estructura. La tercera capa de la pared cardiaca y la más externa es el epicardio, formado por tejido conectivo laxo con redes de fibras elásticas, vasos y nervios.*

El pericardio es una bolsa que recubre todo el corazón. El pericardio permite los movimientos del corazón con un rozamiento mínimo, funciona como lubricante, disminuyendo la fricción en los continuos movimientos cardíacos, e impide los llenados excesivos.

### **2.2.1 Miocardiocito o fibra muscular cardiaca**

*Las fibras cardíacas son fibras musculares estriadas, mucho más cortas que las esqueléticas. Tienen unas 150  $\mu$  de longitud y unas 15-20  $\mu$  de ancho. Son células uninucleadas con un contenido en mitocondrias mucho mayor que en las esqueléticas. Las miofibrillas presentan estriaciones con el mismo bandeo que en el músculo esquelético.*



Fuente: [4https://biologia.laguia2000.com/wp-content/uploads/2015/03/tejido-cardiaco.jpg](https://biologia.laguia2000.com/wp-content/uploads/2015/03/tejido-cardiaco.jpg)

A diferencia de las fibras esqueléticas el retículo sarcoplásmico está menos desarrollado y los túbulos T, que presentan una anchura mayor, se sitúan sobre las líneas Z. Por otro lado, la agrupación de una cisterna del retículo y el túbulo T da lugar a una **diada** más que a una triada.

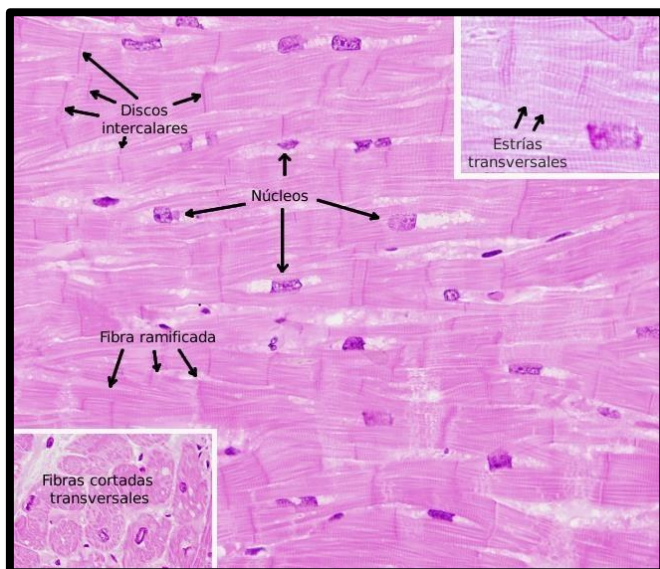
Las fibras cardíacas no presentan un contorno uniforme, sino que tienen prolongaciones o ramificaciones por donde se unen unas con otras formando una especie de red o malla. La zona de contacto entre las fibras cardíacas da lugar a unas regiones especializadas a nivel de la membrana plasmática denominadas **discos intercalares**. Los discos intercalares son un tipo especial de unión intercelular, gap que garantiza la comunicación eléctrica entre estas células; y por otro lado, proporciona lugares de adhesión y anclaje de una célula con otra. Los discos intercalares proporcionan la base estructural que permite que el corazón se comporte como un **sincitio funcional**, ya que no morfológico porque cada célula mantiene su individualidad.

## 2.3 Funcionamiento del corazón

El corazón podría considerarse como una bomba electromecánica; es decir, un sistema que genera de forma automática el impulso cardíaco y lo transmite a todas las células de trabajo.

El músculo cardíaco es un músculo excitable, los miocardiocitos presentan las siguientes características exclusivas:

- a) Son células automáticas capaces de contraerse sin ningún estímulo externo.
- b) Son células rítmicas, lo cual permite que mantengan una frecuencia de contracción suficiente para mantener la actividad de bombeo sin detenciones que pudieran poner en riesgo la supervivencia del organismo. Estas dos características no son observables en la mayor parte de las fibras cardíacas, pero subyacen en todas ellas.



Fuente: <https://mmegias.webs.uvigo.es/a-imagenes-grandes/imagenes/musculo-cardiaco-01.jpg>

Existen dos sincitios musculares, uno el auricular y otro el ventricular, aislados uno del otro por una barrera de tejido fibroso, que constituye el plano donde asientan las válvulas cardíacas.

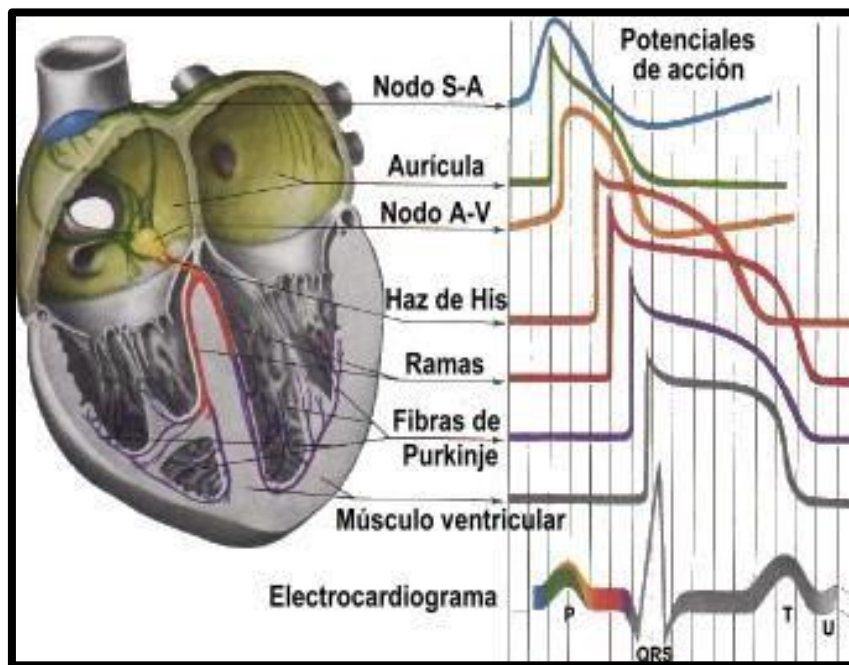
### 2.3.1 Propiedades eléctricas del corazón

Los miocardiocitos son autoexcitables o automáticos, lo que significa que no requieren la presencia de un estímulo externo para generar una respuesta contráctil. Esta

capacidad de despolarizarse y contraerse rítmicamente sin inervación se denomina **ritmicidad miogénica** y es responsable del automatismo cardíaco.

Desde el punto de vista de sus propiedades eléctricas se pueden distinguir dos tipos de fibras cardíacas:

- a) Fibras automáticas o de respuesta lenta.
- b) Fibras de trabajo o de respuesta rápida. Las primeras se caracterizan por ser capaces de generar y conducir el potencial de acción; las segundas, en condiciones normales, no son automáticas y requieren un estímulo para su excitación; sin embargo, en algunas ocasiones, pueden funcionar de forma automática aunque con un ritmo más lento que las primeras.



Fuente: [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:AND9GcTh1mVNuM6gwDJHAlncf7lwXxT0ogD8GNx\\_Qtl60cG9C01uZc1ktrOCfA4xAJ3tEFAQ2Y0&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:AND9GcTh1mVNuM6gwDJHAlncf7lwXxT0ogD8GNx_Qtl60cG9C01uZc1ktrOCfA4xAJ3tEFAQ2Y0&usqp=CAU)

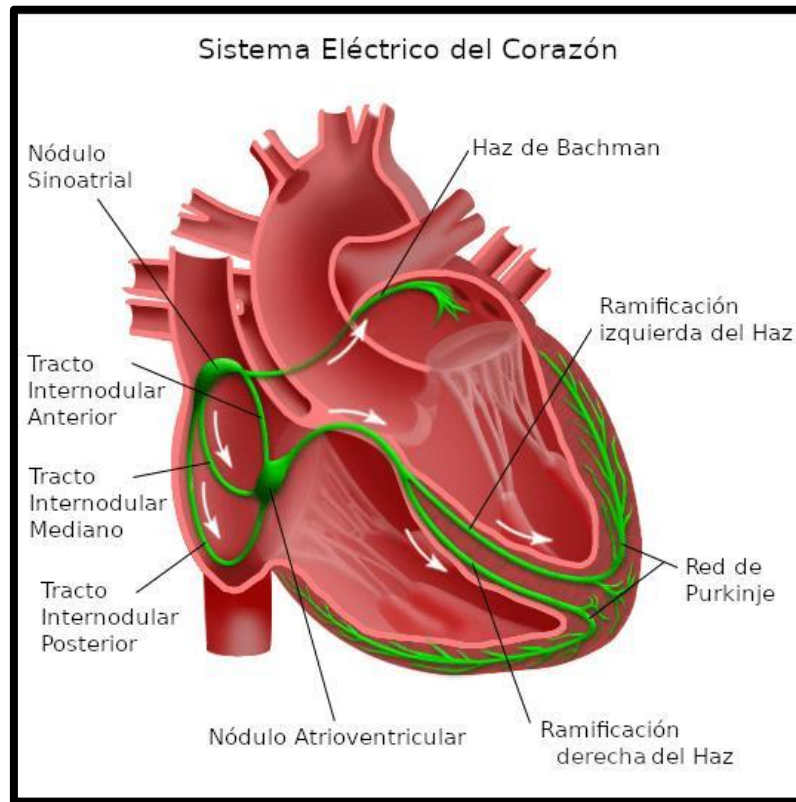
Las fibras de cada región cardíaca se caracterizan por poseer un ritmo distinto, las ventriculares son las más lentas, mientras que un grupo de auriculares poseen el ritmo más elevado. Este grupo de fibras auriculares se denomina **nodo sinusal**, y al presentar la ritmicidad más alta, su actividad es la que marca la frecuencia básica del corazón, denominándose las por ello células **marcapaso**.

La generación y propagación de un potencial de acción cardíaco es posible por la existencia de un sistema especializado de excitación y conducción.

### **Sistema eléctrico del corazón.**

Las fibras que componen este sistema son el nodo sinusal, el nodo aurículo-ventricular, el haz de His y las fibras de Purkinje. La propagación del potencial de acción en las células cardíacas se produce a través de uniones de tipo gap, como si fuese una membrana continua. La despolarización iniciada en el nodo sinusal se expande por todas las fibras auriculares de arriba abajo. Al alcanzar el plano fibroso, sólo dispone de un punto para continuar la propagación, el nodo aurículo-ventricular, en este punto se produce un enlentecimiento (retraso de 0.1 seg) de la propagación debido a la geometría de las fibras que forman este nodo. Se caracteriza este nodo por ser un haz estrecho con pocas uniones gap donde la velocidad de conducción del impulso eléctrico es más baja y, por lo tanto, da lugar a ese retraso. A continuación, el potencial se desplaza

*rápidamente por el resto del sistema de conducción, alcanzando casi al unísono todas las fibras ventriculares.*



Fuente: <https://www.societadsadec.org.ar/wp-content/uploads/2022/02/sistema-electrico-corazon.png>

### **2.3.2 Potencial de acción cardíaco**

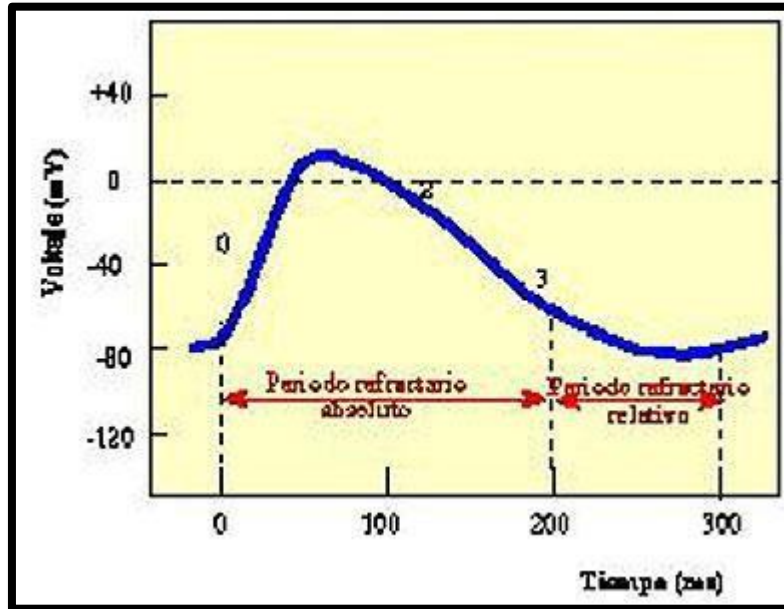
*Para que se desarrolle una respuesta contráctil, lo primero que ha de generarse es una respuesta eléctrica en la membrana. Esta respuesta se denomina potencial de acción cardíaco.*

*La morfología del potencial de acción varía de una célula a otra dependiendo de su localización. Una característica general es su larga duración, a diferencia del músculo esquelético y de las neuronas, cuya duración es de 1-5 ms, el potencial de las fibras cardíacas oscila entre 150 y 300 ms.*

*Este tiempo tan prolongado tiene importantes consecuencias funcionales, ya que van a superponerse en el tiempo el potencial de acción (fenómeno eléctrico) con la contracción de la fibra (fenómeno mecánico). Consecuencia de este tiempo tan elongado es que los periodos refractarios también se extienden, garantizando que el músculo no pueda reexcitarse en ningún momento, excepto muy al final de la contracción.*

Las dos variedades más diferenciadas de potencial de acción son, el potencial marcapasos o potencial de acción de las células de respuesta lenta, y el potencial de acción de las fibras de trabajo o células de respuesta rápida.

### 2.3.2.1 Potencial marcapasos o respuesta lenta



Fuente:

[8https://ocw.unican.es/pluginfile.php/727/mod\\_page/content/1/Imagen2.4.jpg](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/727/mod_page/content/1/Imagen2.4.jpg)

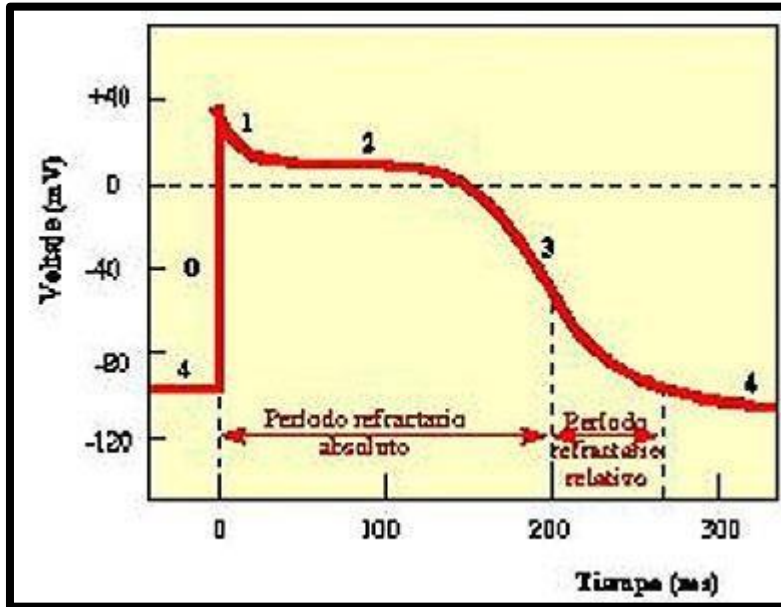
En las células del nodo sinusal y nodo aurículo-ventricular, el potencial de membrana en reposo no se mantiene en un valor estable, sino que presenta una serie de fluctuaciones rítmicas que van a dar lugar a la generación automática y rítmica de potenciales de acción. Las fases en que se desarrolla esta actuación son:

- a) *Fase de reposo inestable. El potencial de membrana no se mantiene constante, sino que va despolarizándose hasta generar el potencial de acción. La apertura de canales para cationes permite que entren cargas positivas y que la célula se despolarice lentamente hasta alcanzar el umbral (-50 mV). Esta lenta despolarización que precede al potencial de acción se conoce como prepotencial, potencial marcapasos o despolarización diastólica, y su desarrollo temporal es un factor clave para la frecuencia cardíaca. A este tipo de potenciales se les describe con el término de respuestas lentas debido a esta fase de pendiente poco pronunciada.*
- b) *Fase de despolarización. Debido a la entrada de iones de  $Ca^{++}$  del exterior.*
- c) *Fase de repolarización.*

*El potencial de acción se propaga por las fibras auriculares dando lugar a los potenciales de acción de dichas fibras y llega al nodo AV antes de que el potencial marcapasos de las células del nodo hayan alcanzado por sí solas el*

umbral. Posteriormente se propaga por el haz de His, y llega a las fibras ventriculares.

### 2.3.2.2 Potencial de acción ventricular o respuesta rápida



Fuente: [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/727/mod\\_page/content/1/Imagen2.5.jpg](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/727/mod_page/content/1/Imagen2.5.jpg)

En el resto de las fibras cardíacas, auriculares y ventriculares, el potencial de acción se desarrolla en las siguientes fases:

**Fase 0** o fase de despolarización rápida.

**Fase 1** o de repolarización breve.

**Fase 2** o de meseta. Es la fase más característica de los potenciales de acción cardíacos. Durante la misma se produce una apertura de canales lentos de Ca.

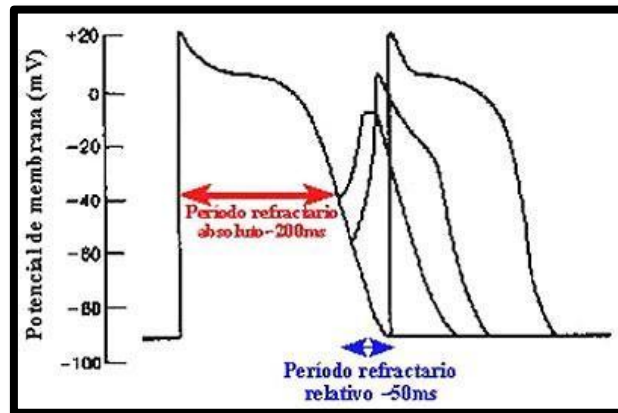
**Fase 3** o fase de repolarización.

**Fase 4** o potencial de membrana en reposo. En condiciones basales estas fibras presentan una gran permeabilidad al potasio, lo que hace que su valor en reposo esté próximo a su punto de equilibrio (-90 mv).

### 2.3.2.3 Periodo refractario

El **periodo refractario absoluto** abarca el tiempo desde que se inicia la fase 0 hasta casi la mitad de la fase 3. Por término medio es de unos 200 ms. El **periodo refractario relativo** abarca el tiempo restante hasta que la membrana se ha repolarizado por completo. Dura unos 50 ms, y hay una cierta recuperación de

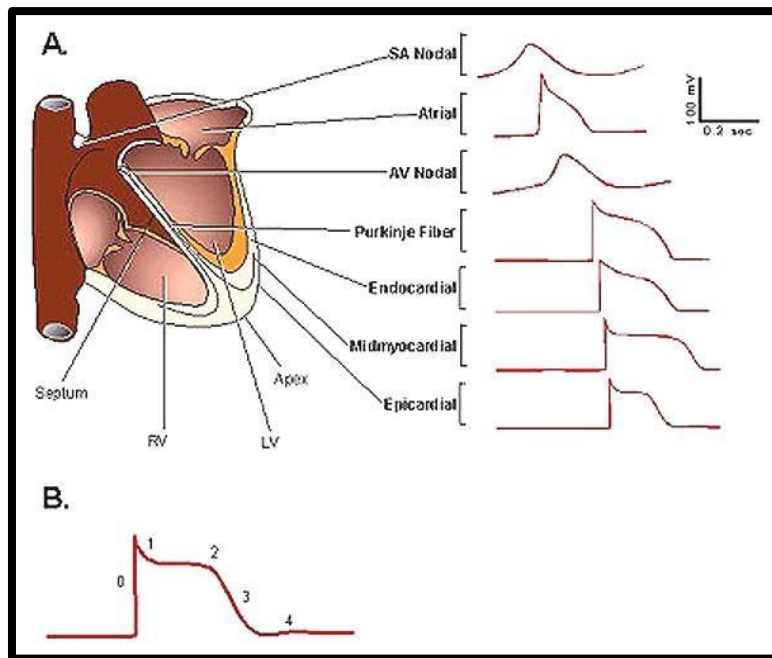
la excitabilidad ya que se pueden generar potenciales de acción si el estímulo es muy fuerte.



Fuente: [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/727/mod\\_page/content/1/Imagen2.6.jpg](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/727/mod_page/content/1/Imagen2.6.jpg)

### 2.3.2.4 Propagación del potencial de acción cardiaco

El potencial de acción iniciado en el nodo sinusal se extiende por todas las fibras cardiacas según la secuencia coordinada descrita en el sistema de conducción. Puede apreciarse el retraso temporal producido en el nodo AV y la rapidez con que el potencial se inicia en todas las fibras ventriculares. Esta despolarización, prácticamente al unísono, permite que la contracción se desarrolle de igual manera y el corazón pueda funcionar como una bomba.



Fuente: [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/727/mod\\_page/content/1/Imagen2.7.jpg](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/727/mod_page/content/1/Imagen2.7.jpg)

### 3. Mecánica cardíaca: el ciclo cardíaco

*Las sucesivas y alternadas contracciones y relajaciones permiten que el corazón funcione como una bomba, impulsando la sangre desde las venas hacia las arterias. Este patrón mecánico se denomina ciclo cardíaco, y consta de dos fases principales: la diástole o fase de relajación; y la sístole o fase de contracción.*

#### 3.1 Propiedades mecánicas de la actividad contráctil de la fibra cardíaca

*Para que las fibras cardíacas inicien el proceso mecánico de la contracción es necesario que la información eléctrica localizada a nivel de la membrana se introduzca al citoplasma celular, que es el lugar donde se encuentra la maquinaria contráctil; por ello, el primer fenómeno que ha de estudiarse es el tránsito de esta información, denominado acoplamiento excitación-contracción.*

##### 3.1.1 Acoplamiento excitación-contracción

*El acoplamiento, al igual que en el músculo esquelético, es un mecanismo dependiente íntegramente del  $Ca^{++}$  presente en el sarcoplasma. La despolarización sostenida durante la fase de meseta en el potencial de acción cardíaco garantiza la entrada de  $Ca^{++}$  necesario para la liberación del almacenado en el retículo.*

##### 3.1.2 Respuesta contráctil del músculo cardíaco

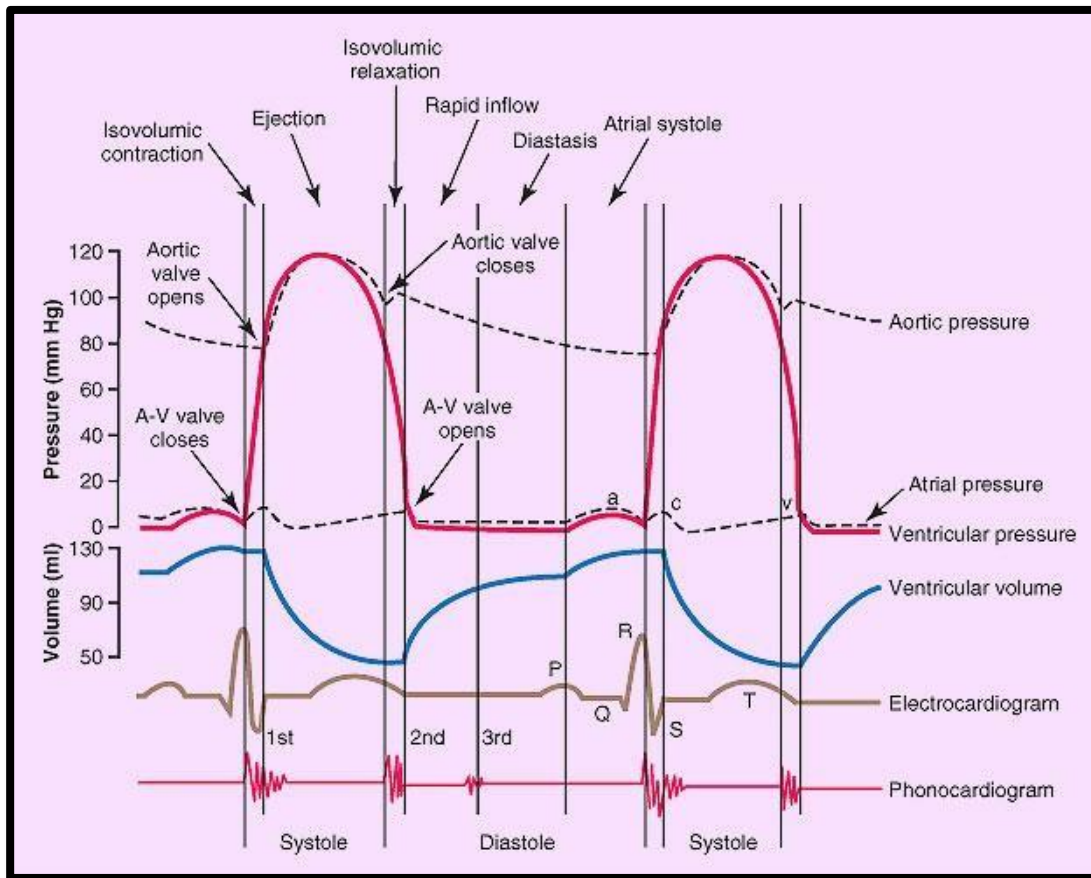
La prolongada duración del potencial de acción tiene como consecuencia que la fase contráctil coincida temporalmente con la membrana en situación de despolarización. El pico de tensión se alcanza antes de la terminación del periodo refractario absoluto, y cuando acaba el periodo refractario relativo, el músculo se encuentra en la mitad de su relajación. Puede observarse, por lo tanto, que hay un estrecho solapamiento entre los dos fenómenos.

ECG y Potencial de la membrana de la Célula Ventricular.

*Debido a esta característica no se puede generar un segundo potencial de acción hasta que el primero no se haya acabado; y cuando esto sucede, también ha finalizado prácticamente la actividad contráctil.*

##### 3.1.3 Propiedades mecánicas

*En la actividad normal del corazón, la distensión que presentan las fibras musculares viene dada por el grado de llenado que tienen las cavidades cardíacas, es decir por la cantidad de sangre que entra en el corazón*



Fuente: [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/728/mod\\_page/content/1/Imagen3.2.jpg](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/728/mod_page/content/1/Imagen3.2.jpg)

procedente de las venas (retorno venoso). A medida que se va cargando el corazón con volúmenes mayores de sangre, las fibras presentarán un grado de distensión mayor y responderán con una fuerza contráctil más alta, lo cual permitirá realizar el bombeo de mayores volúmenes con mayor eficacia. Esta propiedad garantiza que el corazón, en condiciones normales, bombea toda la sangre que recibe.

Las células cardíacas tienen un metabolismo fuertemente aerobio, que les garantiza un adecuado soporte de ATP. Para ello contienen muchas mitocondrias y mioglobina, la cual les proporciona el color rojo. Si se compromete por cualquier alteración el suministro de sangre u oxígeno a las fibras, su capacidad de supervivencia es muy reducida y mueren.

### 3.2 Ciclo cardíaco

La característica más relevante en el comportamiento contráctil del corazón es su función cíclica de bombeo, por ello los parámetros que mejor miden esta actividad son los valores de presión y volumen; de ahí que la descripción del ciclo cardíaco se realice mediante las medidas mencionadas a nivel de las cavidades cardíacas y en los vasos sanguíneos de entrada y salida del corazón.

*El ciclo se desarrolla al mismo tiempo en las dos partes del corazón (derecha e izquierda), aunque las presiones son mayores en el lado izquierdo. La observación al mismo tiempo del ECG permite correlacionar los cambios mecánicos con los acontecimientos eléctricos que los preceden; y añadidamente demuestra la unidad de acción del músculo auricular y ventricular.*

*El cierre y apertura de las válvulas cardiacas genera una serie de vibraciones y de turbulencias en el flujo sanguíneo, que se propagan por los tejidos y originan una serie de ruidos recogidos en un registro denominado fonocardiograma. De forma sencilla, pueden ser percibidos con la ayuda de un fonendoscopio. El 1º ruido, es producido por el cierre de las válvulas aurículoventriculares, en el inicio de la sístole ventricular, y el 2º ruido, es originado por el cierre de las válvulas semilunares, al inicio de la diástole ventricular. Este 2º ruido es menos sonoro que el 1º (de forma onomatopéyica suelen describirse como "lub" el primer ruido y "dub el segundo).*

### **3.2.1 Fases del ciclo cardíaco**

- a) Fase final de la diástole.*
- b) Fase de sístole.*
- c) Fase inicial y media de la diástole.*

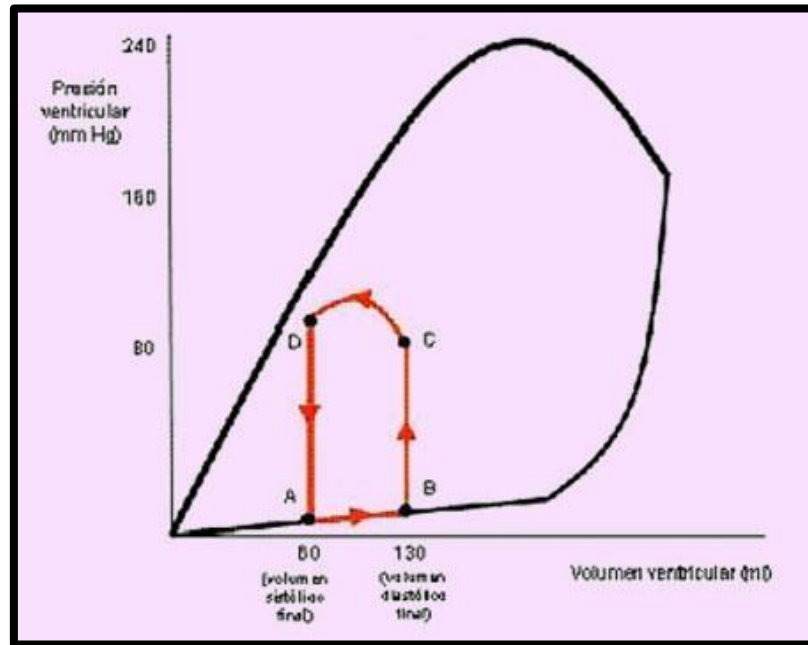
*En un adulto normal la frecuencia cardíaca es de 70 ciclos/minuto, lo que supone menos de 1 segundo por ciclo. La duración media es de 0,8 segundos, los cuales no se distribuyen equitativamente entre sístole y diástole, ya que la diástole dura unos 0,5 segundos y la sístole 0,3 segundos.*

*En la gráfica de la figura pueden observarse las modificaciones de presión y volumen que tienen lugar en el corazón izquierdo, aurícula y ventrículo izquierdos y aorta, además del ECG y los ruidos cardíacos.*

### **3.2.2 Curva presión-volumen o trabajo cardíaco**

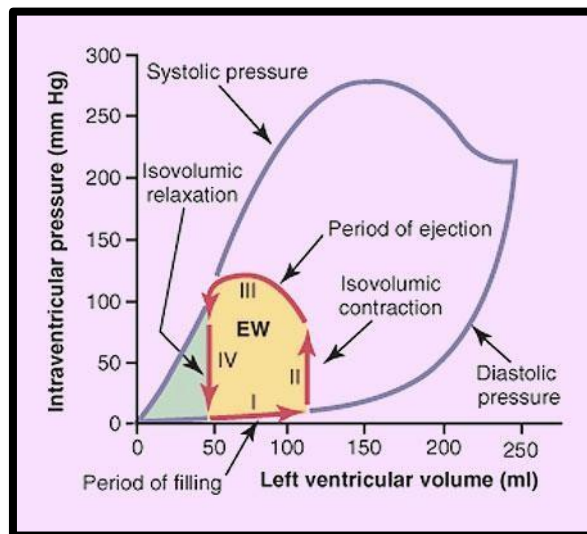
*La función básica del corazón es su papel de bomba, y sus propiedades contráctiles pueden apreciarse mejor en la relación existente entre la presión desarrollada al contraerse y el volumen de sangre que proyecta al árbol circulatorio.*

Puede observarse el recorrido o ciclo ABCDA, donde entre A y B se produce el relleno del ventrículo durante la diástole; de B a C se desarrolla la fase de contracción ventricular isovolumétrica; de C a D se produce la fase sistólica de eyección y, por último de D a A se realiza la fase diastólica de relajación isovolumétrica. Las curvas para el ventrículo derecho e izquierdo son iguales, aunque los valores de presión en el izquierdo son más elevadas.



Fuente: [13https://ocw.unican.es/pluginfile.php/728/mod\\_page/content/1/Imagen3.3.jpg](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/728/mod_page/content/1/Imagen3.3.jpg)

Debajo, la misma imagen en otra representación.



Fuente: [14https://ocw.unican.es/pluginfile.php/728/mod\\_page/content/1/Imagen3.4.jpg](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/728/mod_page/content/1/Imagen3.4.jpg)

## **4. Gasto cardíaco o volumen minuto**

*Se define gasto cardíaco o volumen minuto como la cantidad de sangre bombeada cada minuto por cada ventrículo. De esta forma el flujo que circula por el circuito mayor o menor corresponde a lo proyectado por el sistema de bombeo. Se calcula mediante el producto del volumen sistólico, (volumen impulsado en cada latido cardíaco) por la frecuencia cardíaca (número de latidos o ciclos cardíacos por minuto). Para un individuo adulto medio, el gasto cardíaco se encuentra entre 5-6 litros/min, aunque puede variar dependiendo, por ejemplo, de la actividad que se esté realizando.*

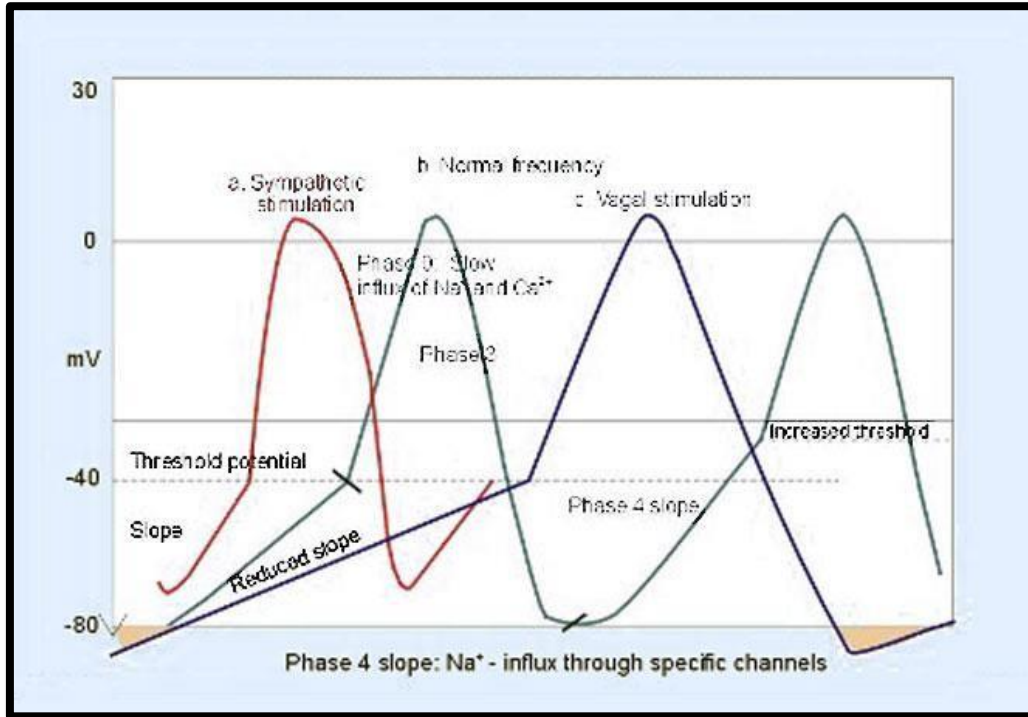
### **4.1 Regulación del gasto cardíaco**

*La regulación de la función de bombeo del corazón depende de forma directa de los valores de la frecuencia cardíaca y del volumen sistólico. En el estudio de la regulación se diferencian dos tipos: una regulación intrínseca, en la que intervienen factores exclusivamente cardíacos, y una regulación extrínseca, determinada por la acción de factores externos.*

#### **4.1.1 Regulación de la frecuencia (efectos cronotrópicos)**

*Aunque el corazón tiene una actividad rítmica intrínseca, existen factores externos a la estructura cardíaca que pueden alterar esta frecuencia basal de contracción. Estos factores son de naturaleza nerviosa y hormonal. El sistema nervioso autónomo, a través de sus dos divisiones, simpático y parasimpático, modifica la frecuencia cardíaca.*

*En un adulto normal la frecuencia cardíaca es de unos 70 latidos/minuto, si ese mismo corazón se le aísla separándole de sus conexiones nerviosas, pasa a realizar 100 latidos/minuto, que es la frecuencia intrínseca de las fibras del nodo sinusal. De esta forma la frecuencia disminuye (bradicardia, o efecto cronotropo negativo), e incluso si la estimulación parasimpática es muy fuerte puede llegar a pararse el corazón. La bradicardia que se produce durante el sueño, se basa en el incremento de actividad parasimpática y en la disminución de actividad simpática.*



Fuente: [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/729/mod\\_page/content/2/Imagen4.1.jpg](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/729/mod_page/content/2/Imagen4.1.jpg)

La estimulación vagal también disminuye la velocidad de conducción del impulso cardíaco, efecto conocido con el término de dromotropismo negativo.

En sentido opuesto se encuentra la acción del sistema simpático, la estimulación simpática que puede aparecer en situaciones de fuerte estrés o de intenso ejercicio físico, aumentan la frecuencia cardíaca (taquicardia, o efecto cronotrope positivo) hasta alcanzar frecuencias de 200-220 latidos/minuto. La velocidad de conducción también se incrementa por la estimulación simpática.

Además de las acciones debidas a la actividad del sistema nervioso autónomo, existen otros factores que tienen influencia sobre la frecuencia cardíaca. Así, la temperatura, cuyo aumento tiene un efecto cronotrope positivo, observable en la taquicardia que aparece en estados febriles. Este efecto, puramente físico, es debido simplemente al hecho de que el aumento de energía térmica da lugar a una mayor movilidad iónica.

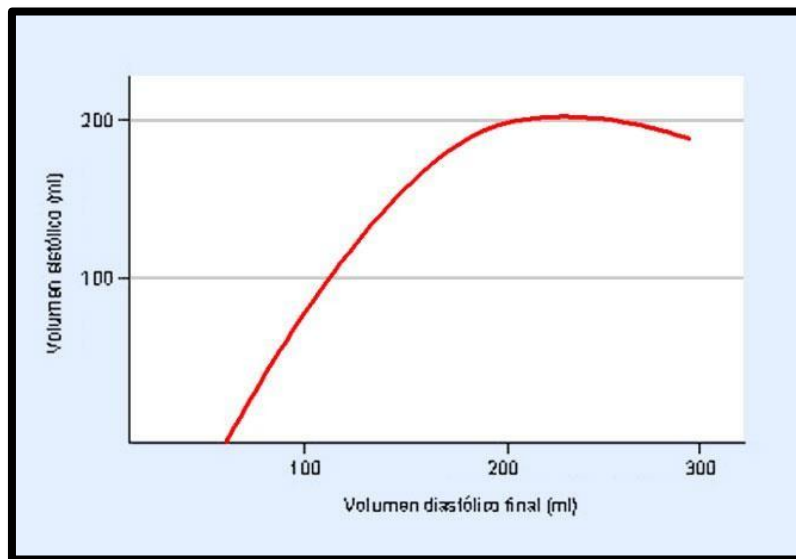
Por último, también la concentración de potasio extracelular juega un papel importante sobre la frecuencia. Incrementos de  $K^+$  producen disminuciones de frecuencia y también de la velocidad de conducción del potencial de acción cardíaco.

#### 4.1.2 Regulación del volumen sistólico (efectos inotrópicos)

El volumen sistólico es el volumen de sangre impulsada por el ventrículo en cada latido, su valor viene determinado fundamentalmente por la fuerza de contracción (contractilidad) del músculo cardíaco. Los factores que afectan a esta propiedad se denominan factores inotrópicos, y como en la frecuencia, se consideran positivos cuando aumentan la contractilidad y negativos cuando la disminuyen.

A diferencia de la frecuencia que sólo estaba influida por factores extrínsecos, el volumen sistólico dispone de dos tipos de mecanismos de regulación diferenciados por su origen.

#### 4.1.3 Regulación intrínseca del volumen sistólico. Mecanismo de Frank-Starling



Fuente: [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/729/mod\\_page/content/2/Imagen4.2.jpg](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/729/mod_page/content/2/Imagen4.2.jpg)

Existen dos factores importantes en la forma de regulación intrínseca que influyen en la respuesta contráctil del músculo cardíaco. Estos factores son:

- a) **La precarga.** Definida como la tensión pasiva que determina, en el músculo cardíaco, la longitud inicial de las fibras antes de la contracción; es decir, la distensión de las fibras (o volumen diastólico final) que las coloca en su longitud inicial previa a la contracción. Dentro de ciertos límites, existe una relación proporcional entre el incremento de la precarga y la respuesta contráctil del músculo cardíaco, representada por la curva de Starling. A mayor volumen diastólico final, mayor volumen sistólico, lo cual garantiza que una mayor afluencia o entrada de sangre al corazón se va a ver compensada por una contracción más energética y una salida

*proporcionalmente también mayor; o, dicho, en otros términos, el corazón bombea toda la sangre que recibe sin permitir remansamientos y ajusta el retorno venoso con el gasto cardíaco (la entrada y la salida dentro de un circuito cerrado). Este comportamiento se conoce como "ley del corazón" o ley de Frank-Starling y una de las funciones que explica es el equilibrio de gasto cardíaco de los ventrículos derecho e izquierdo.*

*b) La poscarga. Es la carga frente a la que deben acortarse las fibras miocárdicas durante la sístole, dicho de otro modo, la carga que debe desplazar el músculo después de iniciarse la contracción. Para el ventrículo izquierdo, la poscarga viene dada por la presión en la aorta.*

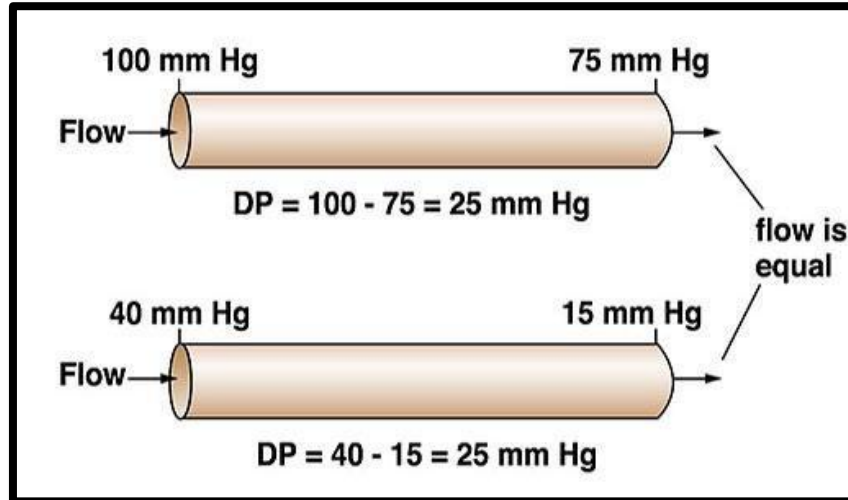
#### **4.1.4 Regulación extrínseca del volumen sistólico**

*Existen una serie de factores extrínsecos que pueden modificar la contractilidad del corazón. El sistema nervioso autónomo es uno de los reguladores principales en la contractilidad de las fibras miocárdicas. En condiciones basales la influencia predominante es simpática, y su efecto es un aumento de la contractilidad (efecto inotrópico positivo) aumentando el vaciado del ventrículo y el incremento de presión sistólica.*

*Otros factores son las concentraciones iónicas de  $K^+$ ,  $Ca^{++}$ , un aumento de la  $[K^+]$  extracelular o una disminución de la  $[Ca^{++}]$  tienen un efecto inotrópico negativo, al igual que los descensos de pH sanguíneos.*

### **5. Hemodinámica o física del flujo sanguíneo**

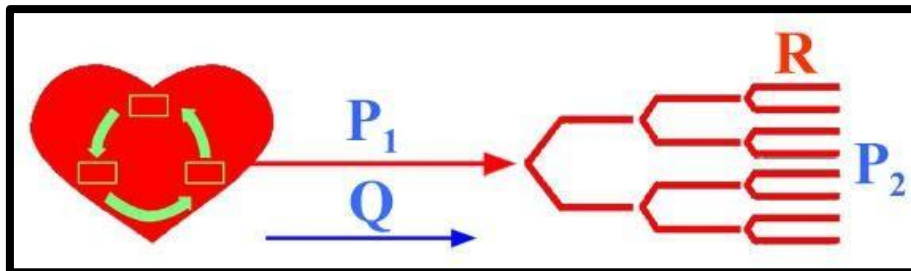
*Un fluido se desplaza en el interior de un tubo cuando la presión en el inicio es superior a la existente al final del tubo, moviéndose desde una zona de mayor presión a una de menor presión. El flujo o caudal depende directamente del gradiente o diferencia de presión entre esos dos puntos e inversamente de la resistencia, en una relación similar a la de Ohm para los circuitos eléctricos.*



Fuente: [17https://ocw.unican.es/pluginfile.php/730/mod\\_page/content/1/Imagen5.1.jpg](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/730/mod_page/content/1/Imagen5.1.jpg)

La resistencia depende de las dimensiones del tubo y de la naturaleza del fluido, y mide las fuerzas de rozamiento o fricción entre las propias moléculas del fluido y entre éstas y las moléculas de la pared del tubo.

La velocidad con la que circula la sangre en el interior de un tubo es directamente proporcional al flujo e inversamente proporcional al área transversal del tubo.



Fuente: [18https://ocw.unican.es/pluginfile.php/730/mod\\_page/content/1/Imagen5.2.jpg](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/730/mod_page/content/1/Imagen5.2.jpg)

$$Q \text{ (flujo o caudal)} = \Delta P (P_1 - P_2) / R \text{ (resistencia)}$$

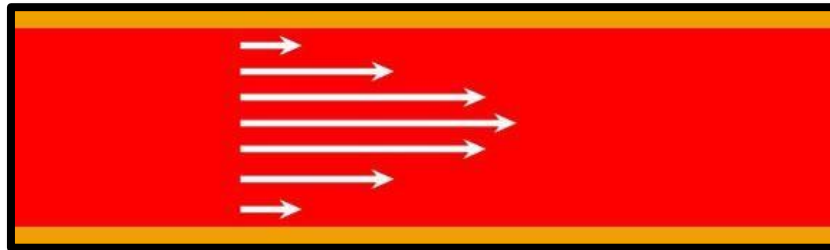
El flujo o caudal (volumen/minuto) se define también como el volumen circulante por un segmento transversal del circuito en la unidad de tiempo:

$$v = Q / \pi r^2$$

## 5.1 Tipos de flujo

### 5.1.1 Flujo laminar

En condiciones fisiológicas el tipo de flujo mayoritario es el denominado flujo en capas o laminar. El fluido se desplaza en láminas coaxiales o cilíndricas en las que todas las partículas se mueven sin excepción paralelamente al eje vascular. Se origina un perfil parabólico de velocidades con un valor máximo en el eje o centro geométrico del tubo.

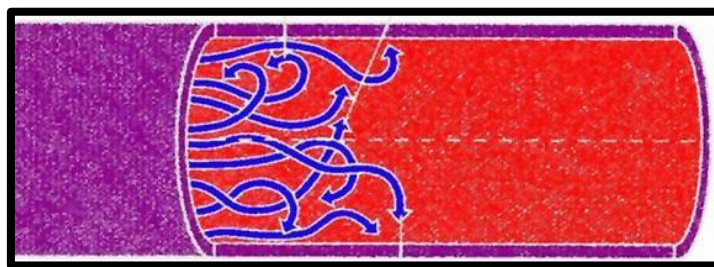


Fuente: [19https://ocw.unican.es/pluginfile.php/730/mod\\_page/content/1/Imagen5.3.jpg](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/730/mod_page/content/1/Imagen5.3.jpg)

En el caso del sistema vascular los elementos celulares que se encuentran en sangre son desplazados tanto más fuertemente hacia el centro cuanto mayor sea su tamaño.

### 5.1.2 Flujo turbulento

En determinadas condiciones el flujo puede presentar remolinos, se dice que es turbulento. En esta forma de flujo el perfil de velocidades se aplana y la relación lineal entre el gradiente de presión y el flujo se pierde porque debido a los remolinos se pierde presión.



Fuente: [20https://ocw.unican.es/pluginfile.php/730/mod\\_page/content/1/Imagen5.4.jpg](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/730/mod_page/content/1/Imagen5.4.jpg)

Para determinar si el flujo es laminar o turbulento se utiliza el número de Reynolds ( $N_R$ ), un número adimensional que depende de:

$$N_R = \frac{2r \times \bar{v} \times \text{densidad}}{\eta}$$

$r$ , radio (m) velocidad media (m/s), densidad (g/cc) y la viscosidad (Pa.s).

*En la circulación sanguínea en regiones con curvaturas pronunciadas, en regiones estrechadas o en bifurcaciones, con valores por encima de 400, aparecen remolinos locales en las capas limítrofes de la corriente. Cuando se llega a 2000-2400 el flujo es totalmente turbulento. Aunque la aparición de turbulencias no es deseable por el riesgo que tienen de producir coágulos sanguíneos, se pueden utilizar como procedimientos diagnósticos, ya que mientras el flujo laminar es silencioso, el turbulento genera ruidos audibles a través de un estetoscopio.*

## **5.2 Resistencias vasculares**

*La resistencia no puede medirse directamente por ser una magnitud compuesta, pudiendo obtenerse de la ecuación inicial al establecer un gradiente de presión entre dos puntos y medir el flujo que se establece:*

$$\text{Resistencia} = \frac{\Delta P}{\text{Flujo}}$$

(mmHg. min/ml, URP → unidad de resistencia periférica hemodinámica).

*Su magnitud depende de las dimensiones del tubo por donde circula el fluido, de su viscosidad y del tipo de flujo o corriente que se realice.*

### **5.2.1 Tipos de resistencia**

*La resistencia periférica total es la suma de las resistencias vasculares. Los vasos sanguíneos en el sistema vascular constituyen una red en la que determinados segmentos se sitúan en serie y otros en paralelo. La resistencia varía dependiendo de la colocación de los vasos.*

### **5.2.2 Viscosidad**

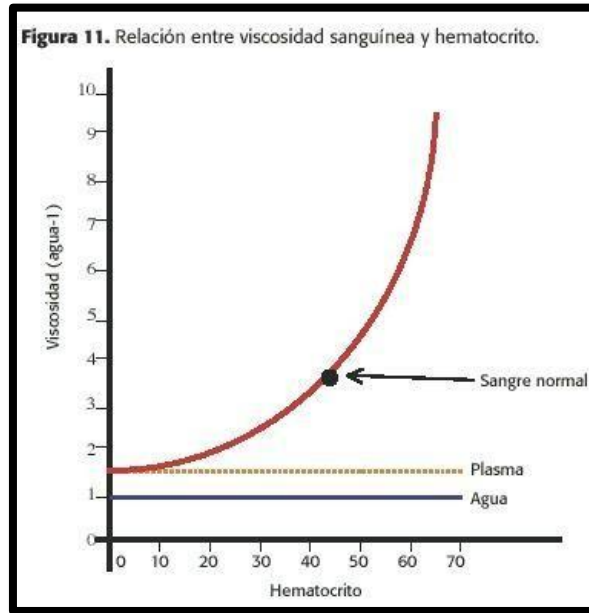
*Uno de los factores que determina la resistencia al movimiento de los fluidos son las fuerzas de rozamiento entre las partes contiguas del fluido, las fuerzas de viscosidad.*

*La viscosidad ( $\eta$ ) se define como la propiedad de los fluidos, principalmente de los líquidos, de oponer resistencia al desplazamiento tangencial de capas de moléculas. Según Newton, resulta del cociente entre la tensión de propulsión ( $\tau$ ) o fuerza de cizalladura y el gradiente de velocidad ( $\Delta v$ ) entre las distintas capas de líquidos.*

$$\eta = \frac{\tau}{\Delta v}$$

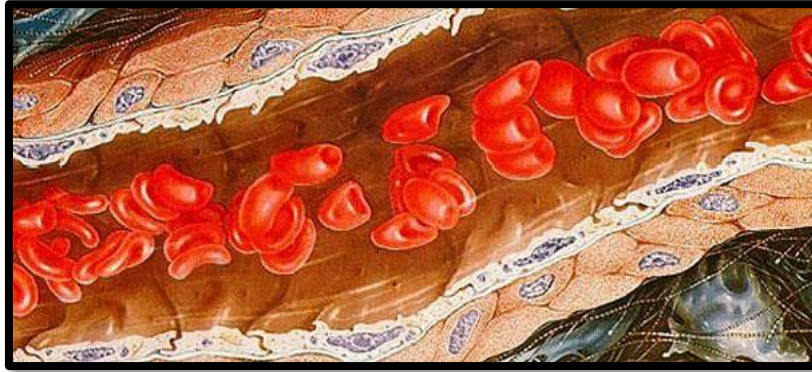
Las unidades de  $\eta$  son Pascales/seg.

Los fluidos newtonianos u homogéneos son los que muestran una viscosidad constante, como el agua, o las soluciones de electrolitos; por el contrario, los fluidos no newtonianos, o heterogéneos, presentan una viscosidad variable, es el caso de la sangre que se modifica dependiendo de las dimensiones del tubo y del tipo de flujo. Cuando la velocidad de la sangre se incrementa la viscosidad disminuye.



Fuente: [21https://www.scielo.sa.cr/img/@pe/rcc/v6n2/2507i10.JPG](https://www.scielo.sa.cr/img/@pe/rcc/v6n2/2507i10.JPG)

Así ha de tenerse en cuenta que la sangre no presenta una viscosidad constante. Al estar formada por células y plasma, las primeras son las responsables principales de la viscosidad sanguínea, y tanto el hematocrito como la velocidad del flujo y el diámetro del vaso modifican la viscosidad de la sangre. A altas velocidades, la viscosidad disminuye al situarse las células preferentemente en el eje central del vaso.



Fuente: [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/730/mod\\_page/content/1/Imagen5.9.jpg](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/730/mod_page/content/1/Imagen5.9.jpg)

### 5.3 Relaciones entre el flujo, la presión y la resistencia. Ley de Poiseuille

*En flujos laminares que se desarrollan en tubos cilíndricos, se pueden deducir las relaciones entre la intensidad del flujo, el gradiente de presión y la resistencia o fuerzas de fricción que actúan sobre las capas de envoltura.*

*La Ley de Poiseuille (o de Hagen-Poiseuille) es una ecuación hemodinámica fundamental en la que se establece:*

$$\text{Flujo} = \frac{\Delta P \cdot \pi \cdot r^4}{8 \cdot \eta \cdot l}$$

8 es el factor que resulta de la integración del perfil de la velocidad.

*Debido a que la longitud de los vasos y la viscosidad son relativamente constantes, el flujo viene determinado básicamente por el gradiente de presión y por el radio. De la ecuación representada, destaca el hecho de que el radio al estar elevado a la cuarta potencia se constituye como el factor más importante. Si suponemos un vaso con un flujo de 1 ml/seg al aumentar el diámetro dos veces el flujo pasa a ser de 16 ml/seg, y si el diámetro aumenta cuatro veces el flujo pasará a ser 256 ml/seg. Por esta relación se puede justificar el papel preponderante que los cambios en el radio del conducto juegan en la regulación del flujo sanguíneo.*

*La ecuación de Poiseuille está formulada para flujos laminares de fluidos homogéneos con viscosidad constante, sin embargo, en los vasos sanguíneos estas condiciones no siempre se cumplen; si la velocidad del flujo es alta o si el gradiente de presión es elevado, se pueden generar remolinos o turbulencias que modifican el patrón del flujo. Al producirse turbulencias se necesitarán gradientes de presión mayores para mantener el mismo flujo.*

## 5.4 Propiedades de la pared vascular

La pared de los vasos sanguíneos está formada por una capa de células epiteliales, el endotelio, y cantidades variables de colágeno, elastina y fibras musculares lisas. La capacidad de deformación y recuperación de un vaso es un factor importante en la hemodinámica.

A través de la pared vascular se mide una diferencia de presión entre el interior y el exterior, denominada presión transmural. La presión intravascular se debe a la contracción cardíaca, así como a la distensión elástica de la pared. La presión exterior es la presión hidrostática de los líquidos intersticiales y presenta un valor próximo a cero. Si la presión exterior es superior a la del interior, el vaso se colapsará.

La presión transmural (según la ley de Laplace para cilindros huecos de extremos abiertos) dependerá del radio del cilindro "r"; del espesor de la pared "e"; y de la tensión parietal T o fuerza por unidad de longitud.

$$P_t = P_i - P_o = \frac{T \cdot e}{r}$$

Esta tensión parietal puede despejarse de la ecuación anterior,

$$T = \frac{(P_i - P_o)r}{e}$$

Siendo  $P_i - P_o$  la presión transmural ( $P_t$ ), o diferencia de presión entre el interior del vaso y el exterior; r el radio del vaso y, e, el espesor de la pared vascular. La tensión parietal se mide en N/m. Así a igual presión, la tensión parietal será tanto mayor cuanto mayor sea el radio y cuánto más delgada sea la pared.

### 5.4.1 Relación presión-volumen o estudio de la complianza

Las propiedades elásticas o de distensibilidad de los vasos sanguíneos dependen, tanto del número, como de la relación entre las fibras elásticas y colágenas que forman parte de su pared. Si se compara a la altura del mismo segmento vascular sistémico, las arterias son de 6 a 10 veces menos distensibles que las venas.

La capacidad de deformación y recuperación de un vaso puede medirse como la relación entre los cambios de volumen y presión en el interior del mismo. Esta propiedad se conoce con el nombre de elastancia ( $\Delta P/\Delta V$ ) o bien su inverso, la complianza ( $\Delta V/\Delta P$ ). Cuando un vaso posee una pared fácilmente deformable su complianza grande. Las arterias son vasos de complianza media a presiones fisiológicas; sin embargo, a presiones elevadas se vuelven rígidos y con complianzas cada vez menores.

*Las venas son vasos que, aunque menos deformables que las arterias presentan una gran capacidad a presiones bajas de acomodar volúmenes crecientes de sangre. Esto es debido a su morfología, ya que al pasar de secciones elípticas a secciones circulares incrementan su volumen., de ahí que sean descritos como vasos de capacitancia. En el rango de volúmenes y presiones fisiológicos del sistema vascular, las venas sistémicas son unas diez veces más distensibles que las arterias.*

## **5.5 Relaciones entre las variables hemodinámicas**

*El volumen de sangre situado en cada uno de los segmentos del árbol circulatorio no es equitativo. De los aproximadamente 5 litros de sangre del aparato circulatorio, en situación de pie, un 84 % se sitúa en el circuito mayor, un 9 % en el circuito menor y un 7 % en el corazón. De la sangre alojada en la circulación mayor el 75% se sitúa en el sistema venoso, descrito ya como sistema de capacitancia o reservorio.*

*La velocidad de la sangre depende del área total transversal de cada sección analizada. Así en aorta y grandes arterias, aunque el flujo es pulsátil la velocidad es alta (20cm/s), va disminuyendo a nivel de las arteriolas alcanzando su valor más bajo en los capilares (0.03 cm/s), este valor permite que haya tiempo suficiente para los intercambios que han de realizarse en esta sección. En las venas se alcanzan velocidades menores que en el mismo segmento arterial debido a que la sección transversal venosa siempre es mayor que la arterial.*

*El principal segmento vascular donde se observa un mayor descenso de la presión corresponde al segmento arteriolar, ya que es en este punto donde se miden los mayores valores de resistencia.*

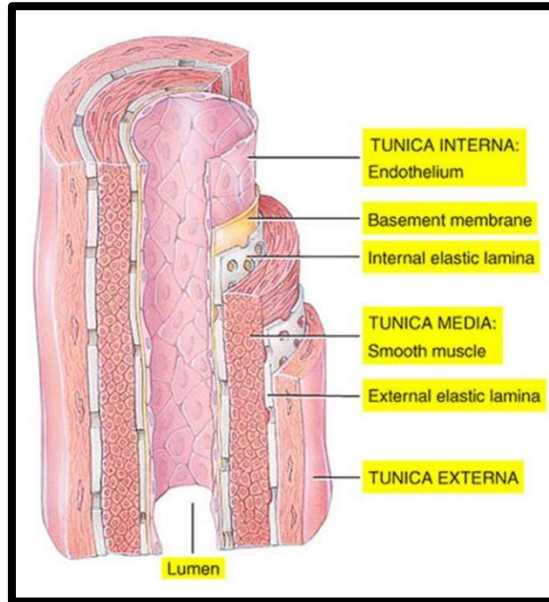
## **6. Circulación arterial. Presión arterial**

### **6.1 Sistema arterial. Características generales**

*El sistema arterial consiste en una serie de vasos, sucesivamente ramificados, que van desde las arterias de gran calibre como la aorta y la pulmonar, pasando por las de mediano, pequeño calibre y arteriolas, hasta los capilares o vasos de intercambio.*

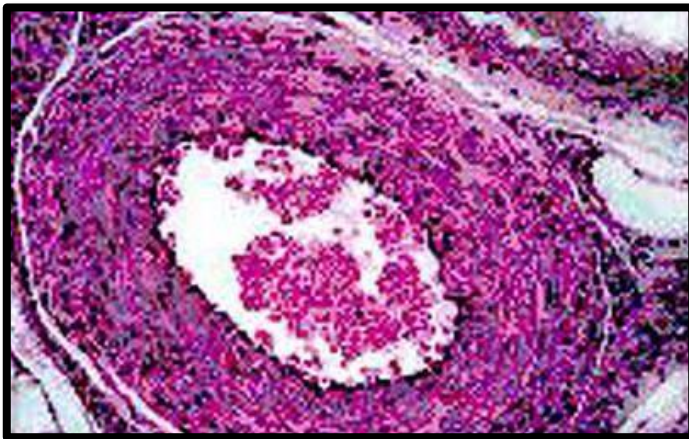
#### **6.1.1 Estructura de las paredes arteriales**

*La estructura de la pared arterial está organizada en función de los fenómenos mecánicos que tiene que soportar. La pared arterial es una pared más gruesa que la venosa, ya que esta porción del árbol circulatorio va a estar sometida a mayores presiones.*



Fuente: [23https://ocw.unican.es/pluginfile.php/731/mod\\_page/content/1/Imagen6.2.jpg](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/731/mod_page/content/1/Imagen6.2.jpg)

Su estructura histológica varía dependiendo de la función que deba desarrollar cada segmento arterial. Como todo vaso sanguíneo dispone de tres capas: íntima, media y adventicia, siendo la túnica media la capa más gruesa de la pared arterial.



Fuente: [24https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQSVkP89HFMBjcZPMZIo-d\\_Os6R26hHvRfW1w&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQSVkP89HFMBjcZPMZIo-d_Os6R26hHvRfW1w&usqp=CAU)

### 6.1.2 Clasificación de las arterias

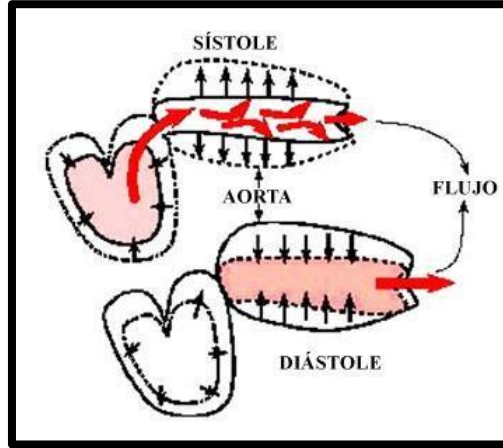
Las arterias se clasifican en arterias **elásticas** o **musculares** dependiendo de la proporción de fibras elásticas o musculares presentes en la capa media de la pared vascular. La aorta y las grandes arterias tienen gruesas paredes, la túnica media, también gruesa, está formada por capas concéntricas de tejido

elástico, separadas por capas de fibras lisas y tejido conectivo; la túnica adventicia es relativamente delgada. Las arterias de menor calibre y las arteriolas presentan una cantidad proporcionalmente mayor de músculo liso, en comparación al espesor de su pared. Este incremento proporcional de músculo permite modificaciones del radio arterial muy precisas, y, por lo tanto, un fuerte control sobre la distribución del flujo sanguíneo.

### 6.1.3 Funciones principales de las arterias

Las arterias realizan cuatro funciones principales:

- a) *Conducción.* El sistema arterial es, básicamente, un sistema de canalización entre el corazón y las regiones de intercambio capilar.
- b) *Filtro hidráulico o amortiguador de la pulsatilidad.* La actividad cíclica de la bomba cardíaca genera oscilaciones de presión y flujo que son amortiguadas según la sangre avanza en el árbol arterial. Esta disminución de las fluctuaciones de presión y de flujo es realizada principalmente por las arterias de menor calibre y por las arteriolas; y tanto la presión arterial periférica como el flujo sanguíneo son continuos a nivel capilar.
- c) *Reservorio de presión.* Debido a que el corazón es una bomba intermitente, el avance de la sangre se produciría en el sistema vascular, únicamente durante la fase de empuje o fase sistólica. Sin embargo, la estructura elástica de la pared arterial permite almacenar parte de la energía cinética proporcionada por el ventrículo, como energía potencial en la expansión de la pared. Así, posteriormente en la diástole, la pared vuelve a su estado inicial o de reposo, imprimiendo energía cinética a la sangre acumulada en su interior.
- d) *Regulador de la distribución del flujo sanguíneo.* Esta función corresponde básicamente a las arteriolas o **vasos de resistencia**. La pared arteriolar presenta el mayor contenido proporcional en fibras musculares y, por lo tanto, es el principal vaso que puede modificar ampliamente su calibre y controlar el flujo sanguíneo que llega a un determinado territorio vascular. El control del calibre arteriolar (**vasoconstricción o vasodilatación**) está estrechamente regulado a través de factores locales, nerviosos vegetativos y hormonales.

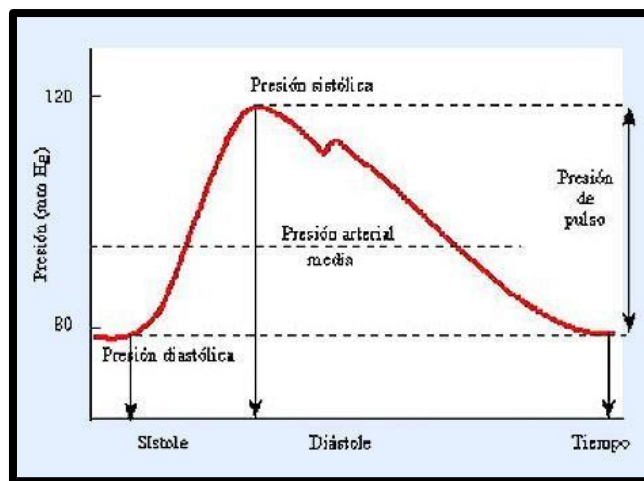


Fuente: [25https://ocw.unican.es/pluginfile.php/731/mod\\_page/content/1/Imagen6.3.jpg](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/731/mod_page/content/1/Imagen6.3.jpg)

## 6.2 Presión arterial

La presión o tensión arterial es la fuerza por unidad de superficie ejercida por la sangre contra las paredes vasculares. Esta fuerza de empuje es el único impulso con que la sangre ha de recorrer todo el circuito vascular para poder retornar al corazón. La presión viene determinada por el volumen de sangre que contiene el sistema arterial y por las propiedades de las paredes, si varía cualquiera de los dos parámetros, la presión se verá modificada.

Tan sólo una tercera parte del volumen sistólico sale de las arterias durante el periodo de sístole, y el volumen restante distiende las arterias incrementando la presión arterial. Al terminar la contracción ventricular, las paredes arteriales distendidas vuelven de forma pasiva a su posición de partida y la presión arterial empuja la sangre a las arteriolas.



Fuente: [26https://i0.wp.com/cardiacos.net/wp-content/uploads/2015/07/m\\_ConceptosPresion.jpg?resize=400%2C291](https://i0.wp.com/cardiacos.net/wp-content/uploads/2015/07/m_ConceptosPresion.jpg?resize=400%2C291)

La curva de presión aórtica es el modelo tipo de los cambios de presión que ocurren en las grandes arterias. La presión máxima se obtiene durante el periodo de la eyección ventricular y recibe el nombre de presión sistólica. La presión mínima se mide en el momento final de la diástole, previo a la contracción ventricular, y se denomina presión diastólica. En la curva correspondería la primera a 120 mm Hg y la segunda a 80 mm Hg, indicándose simplemente como 120/80. Estas medidas utilizan algunas convenciones de partida, la primera es que la presión atmosférica se usa como referencia cero, los valores están dados por encima de los 760 mm Hg ambientales y la segunda es que todas las presiones utilizadas en el aparato circulatorio se refieren a nivel del corazón.

La presión arterial media es un parámetro cardiovascular importante ya que proporciona el valor de presión con que la sangre llega a los tejidos, es por lo tanto la fuerza efectiva que conduce la sangre a lo largo del sistema vascular. Su medida exacta se realiza calculando el área bajo la curva de presión dividida por el intervalo de tiempo; aunque puede estimarse a través de cálculos más sencillos, como el que sigue,

$$\text{PAM} = (2 \text{ PAD} + \text{PAS}) / 3$$

## 2.1 Medida de la presión arterial

La medida se realiza habitualmente mediante la utilización de una variante de manómetro, denominado esfigmomanómetro. Existen esfigmomanómetros de tres clases: de mercurio, aneroides y electrónicos. Los más exactos son los de mercurio, ya que los otros modelos necesitan de calibración frecuente. Están formados por:

- a) Un **manguito** de compresión, constituido por una bolsa hinchable situada dentro de una cubierta no distensible.
- b) Una **fuerza de presión** constituida, habitualmente, por una perilla de goma y una válvula de presión que permite regular la presión ejercida sobre el brazo.
- c) Un **manómetro** que mide la presión en milímetros de mercurio ejercida por el manguito de compresión, en realidad las presiones medidas corresponden al aire contenido en el manguito. Las dimensiones del manguito deben adaptarse al grosor del brazo de la persona a la que ha de hacerse la medida.



Fuente: <https://www.engenerico.com/wp-content/uploads/2019/05/D%C3%ADa-Mundial-de-la-Hipertensi%C3%B3n-Arterial-AESEG-Asociacion-Espanola-de-Medicamentos-Genericos.jpg>

*Han de adoptarse una serie de condiciones de partida uniformes, dentro de las cuales se encontrarían:*

- a) La persona a la que se realice la medida estará sentada, con el brazo formando un ángulo aproximado de 45° con respecto al tronco.*
- b) El brazo donde se va a tomar la presión permanecerá apoyado, procurando que la ropa no le comprima y que la musculatura esté relajada.*
- c) Se aplicará el manguito de tal manera que su borde inferior quede unos dos o tres cm. por encima de la línea de flexión del codo, debiendo quedar el borde inferior del manguito aproximadamente a la altura del **cuarto espacio intercostal**, en las proximidades del esternón.*
- d) Se mantendrá **reposo** al menos en los 15 minutos previos a la medida.*

*Existen dos procedimientos o métodos:*

- a) Método palpatorio. Con una mano se palpa el pulso radial (o humeral) y se infla el manguito hasta que el pulso desaparece. A continuación se procede a desinflar lentamente (2 mm Hg/seg) y cuando se nota de nuevo el pulso, la presión marcada en el manómetro corresponde con la presión arterial sistólica. Posteriormente se continua el desinflado hasta que el pulso se hace normal y en ese punto se mide en el manómetro la presión diastólica. Es un método bastante impreciso, ya que la determinación de la presión diastólica exige una gran destreza en la palpación del pulso.*
- b) Método auscultatorio. Es el más utilizado en la práctica. Se procede de la siguiente manera: se sitúa el estetoscopio en la flexura del codo sobre la arteria braquial, no se aprecia ningún sonido debido a que el flujo en su interior es un flujo laminar y no genera ruido; se infla el manguito hasta que*

desaparece el pulso radial lo que supone que la arteria humeral queda bloqueada por la presión ejercida en el brazo. A continuación, se desinfla lentamente (2-3 mm Hg/seg) y cuando la presión en la arteria durante la eyección sistólica iguala la del manguito la sangre supera la zona de oclusión y pasa de forma turbulenta generando una secuencia de ruidos que se denominan ruidos de Korotkoff. Se distinguen varias etapas:

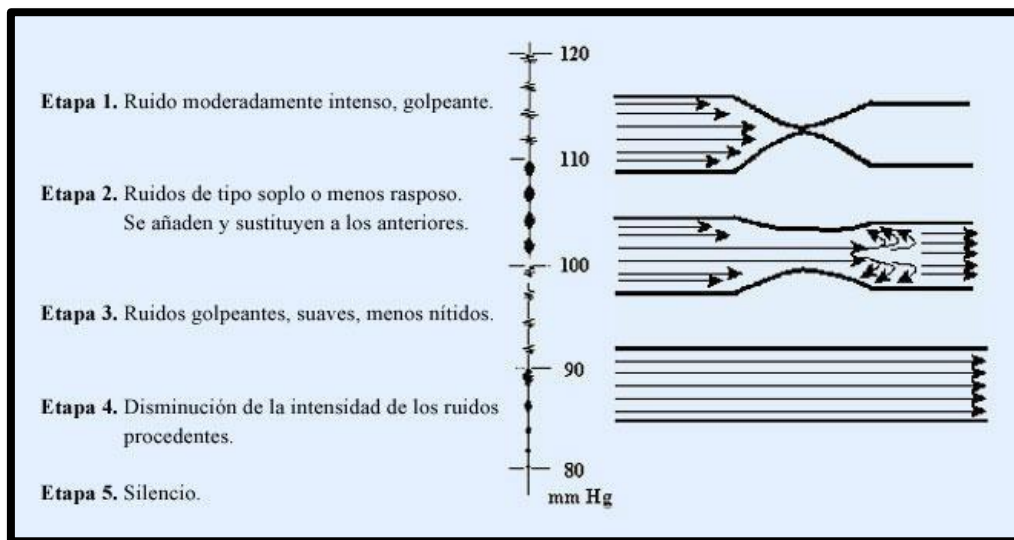
**Etapa 1:** inicio de sonidos que son tenues y galopantes, y van aumentando de intensidad. En este punto la presión medida corresponde a la presión arterial sistólica.

**Etapa 2:** desaparición momentánea de sonidos o sonidos muy tenues, descritos como de susurro o sopro más o menos rasposos.

**Etapa 3:** sonidos golpeantes, más potentes y agudos aunque sin lograr la intensidad de los primeros latidos.

**Etapa 4:** los sonidos se suavizan brusca y repentinamente, siendo mas sibilantes.

**Etapa 5:** los sonidos cesan totalmente, la presión sobre el brazo no comprime la arteria y el flujo que corre en su interior es laminar y no turbulento. La presión en este punto corresponde a la presión arterial diastólica.



Fuente: [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/731/mod\\_page/content/1/Imagen6.6.jpg](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/731/mod_page/content/1/Imagen6.6.jpg)

Los valores normales en la población presentan una cierta variación. Para un adulto joven y sano los valores de 120 mm. Hg para la presión sistólica y 80 mm. Hg para la diastólica se consideran como normales. Factores constitucionales (sexo, raza, peso) y del estilo de vida (dieta, hábitos como el consumo de tabaco o alcohol, etc.) influyen de forma muy importante en la presión arterial.

### 6.2.2 Factores determinantes de la presión arterial media

*Existen dos factores cardiovasculares que determinan los valores de la presión arterial: el volumen de sangre contenido en el aparato circulatorio y las características de distensibilidad de las paredes vasculares.*

- a) El volumen arterial depende del equilibrio entre el flujo de entrada de sangre a las arterias (gasto cardíaco) y el flujo de salida de sangre de las arterias a los capilares (resistencia periférica). Cualquier modificación del volumen de sangre arterial representa simplemente la diferencia entre las velocidades de entrada y salida. El aumento de gasto cardíaco provoca un incremento en la presión arterial media. Pasar de un gasto de 5 l/min a uno de 10 l/min, supone incrementar la presión arterial media de 100 mm Hg a 200 mm Hg.*
- b) Si la distensibilidad disminuye por un aumento de resistencia periférica, la presión arterial igualmente se incrementa.*

*En conclusión, la presión arterial media depende del gasto cardíaco y de la resistencia periférica, si ambos parámetros se mantienen constantes, la presión no se modificará, si la modificación de uno de ellos no es compensada por el otro, la presión arterial media variará ajustándose a los nuevos valores.*

### 6.3 Pulso arterial. Presión de pulso

*El corazón envía sangre de manera pulsátil a las arterias, en cada sístole entra un volumen de sangre en la aorta que dará lugar a un incremento de presión, y en cada diástole la presión disminuirá, estos cambios cíclicos generan una onda de presión o pulso arterial. En esta onda, hay una porción ascendente que se desarrolla durante la sístole ventricular, y una fase descendente, que se inicia con una pequeña disminución de presión, volviendo a aumentar y generando una muesca que se conoce con el nombre de incisura aórtica o incisura dicrótica, producto del cierre de la válvula aórtica.*

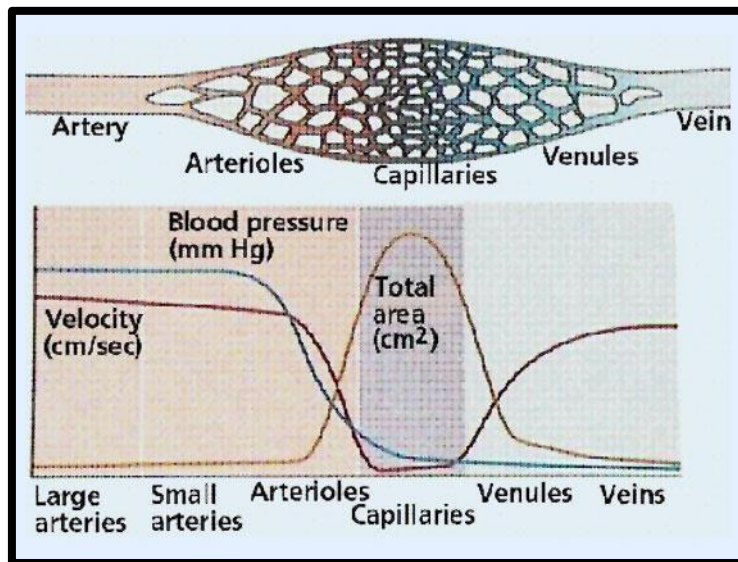
*La diferencia entre la presión arterial sistólica y la diastólica se denomina presión diferencial o presión de pulso.*

$$\text{Presión de Pulso} = \text{PAS} - \text{PAD}$$

#### 6.3.1 Transmisión de la onda de pulso

*La onda de presión se transmite hacia los vasos periféricos a través de las elásticas paredes arteriales y de la columna de sangre, incrementando su velocidad desde la aorta torácica (5m/s) hasta las arterias terminales (20m/s); este incremento en la velocidad de la onda de pulso se debe a la menor distensibilidad o mayor rigidez de la pared arterial, según disminuye el calibre del vaso.*

El desplazamiento de la onda de pulso no guarda correlación con el desplazamiento de la sangre en el interior del vaso, ya que la velocidad de la sangre disminuye mientras que la de la onda del pulso aumenta.



Fuente: [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/731/mod\\_page/content/1/Imagen6.7.jpg](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/731/mod_page/content/1/Imagen6.7.jpg)

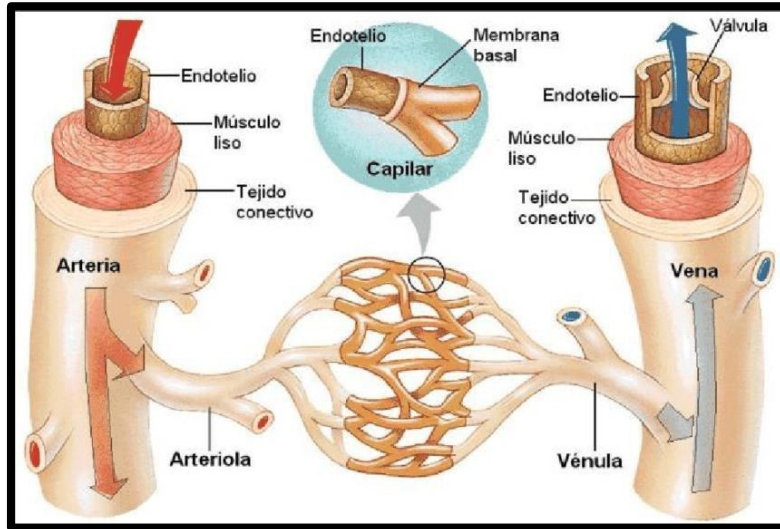
La palpación del pulso sobre las paredes arteriales constituye un procedimiento de estimación muy sencillo de la función vascular y cardíaca. Se puede utilizar cualquier arteria accesible, aunque habitualmente se palpa la arteria radial en la cara anterior de la muñeca. De la palpación del pulso se valora la frecuencia, el ritmo, la amplitud, la dureza o la velocidad con que se transmite, datos todos ellos que permiten valorar el funcionamiento del sistema cardiovascular.

## 7. Circulación capilar

La circulación capilar desarrolla la función básica y última del sistema cardiovascular: el intercambio de sustancias entre la sangre y las células del organismo facilitando su supervivencia.

### 7.1 Estructura y tipos de vasos capilares

Los capilares son las ramas más pequeñas del árbol circulatorio, y son el centro del sistema de la microcirculación. De la porción final de las arteriolas, se originan las metaarteriolas, punto de origen de los capilares. Éstas, con un diámetro de 10-20  $\mu$ , conservan fibras de músculo liso situadas de forma discontinua. En su punto de origen, los capilares están rodeados de un anillo de músculo liso denominado esfínter precapilar, éste se contrae o relaja determinando el flujo existente en un lecho capilar concreto, aunque no están presentes en todos los territorios.



Fuente:

30<https://www.researchgate.net/publication/327890265/figure/fig1/AS:675089255251973@1537965229992/Figura-7-Estructura-de-los-vasos-sanguineos.png>

Por término medio, un capilar mide aproximadamente 1 mm de longitud y su diámetro está entre 5 y 10  $\mu$ m, dejando pasar justo un eritrocito (que en muchos casos ha de hacerlo deformándose). Se estima que en un adulto existen unos 40.000 millones de capilares, lo que, en función de longitud individual, daría unos 40.000 km de capilares, esto supone una superficie total disponible para el intercambio de 700 m<sup>2</sup>. En su conjunto, representa el mayor sistema de comunicación entre las células y la sangre. Ninguna célula viva se encuentra alejada más allá de 20 micras de un capilar, distancia suficientemente pequeña para que el intercambio resulte extraordinariamente eficiente.

El flujo sanguíneo en el lecho capilar es el 5% del gasto cardíaco y depende estrechamente del resto de los vasos que integran la microcirculación. La estructura de los capilares varía de órgano a órgano, pero típicamente están formados por una capa única de células endoteliales apoyadas sobre una membrana basal. Carecen de músculo liso y de fibras elásticas.

### 7.1.1 Estructura de la pared capilar

Todo el sistema circulatorio está interiormente tapizado por una capa de células de epitelio escamoso que, en conjunto, reciben el nombre de **endotelio**. La pared capilar está formada por una sola capa de células endoteliales y una membrana basal externa.

Las células endoteliales presentan espacios intercelulares entre ellas por los que pueden pasar sustancias susceptibles de intercambio. El número y tamaño de estos canales, poros o fenestraciones es muy variable y depende del tipo de

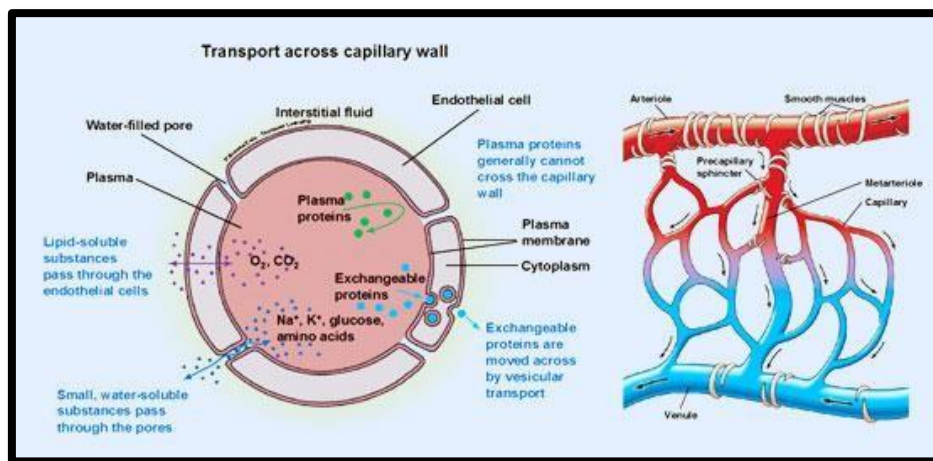
capilares analizado. Según la forma y la cantidad de estos poros, los capilares se clasifican en:

- a) *Capilares continuos.* Son los más abundantes, presente en muchos lechos vasculares. Presenta uniones estrechas abundantes. Sus células firmemente adosadas entre sí, apenas dejan espacios entre ellas, y hacen que la zona sea prácticamente impermeable.
- b) *Capilares fenestrados.* Como indica su nombre, la presencia de ventanas o fenestraciones es su rasgo más característico. Estos poros pueden estar obturados o no por un diafragma. Estos rasgos permiten decir que a través de estos capilares pasan sustancias de mayor peso molecular que las que lo hacen a través de los capilares continuos.
- c) *Capilares discontinuos o sinusoides.* En este tipo de capilares, la pared está completamente interrumpida, dejando grandes espacios entre las células endoteliales.

## 7.2 Intercambio a nivel capilar

Cuando la sangre alcanza el lecho capilar, la velocidad con que circula por el interior de estos vasos es muy baja. Ello es debido a que en un sistema de tubos que se ramifica, la velocidad disminuye proporcionalmente al aumento de la sección conjunta de las ramificaciones. Así en la aorta, de sección pequeña, la velocidad es muy grande (400 mm/seg), va descendiendo a nivel de arterias y arteriolas y a nivel capilar se hace mínima (0.1 mm/seg). Este dato junto con la delgadez de la pared capilar proporciona las condiciones de tiempo y espacio necesarias para que el intercambio pueda efectuarse de la manera más óptima posible.

### 7.2.1 Tipos de intercambio entre capilares y líquido intersticial



Fuente: [31https://ocw.unican.es/pluginfile.php/732/mod\\_page/content/1/Imagen7.2.jpg](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/732/mod_page/content/1/Imagen7.2.jpg)

Existen tres modalidades de transporte a través de la pared capilar: difusión, pinocitosis o transporte vesicular y ultrafiltración o reparto de líquidos.

- a) *Difusión. Es el mecanismo más importante de los tres. Es un tipo de transporte pasivo, regulado por la ley de Fick (Cap. Fisiología Celular). Todos los intercambios entre la sangre y las células utilizan como vía intermediaria el líquido intersticial. Los gradientes para la correcta difusión de gases respiratorios, nutrientes y productos de desecho se crean por el metabolismo celular que consume unos y produce otros, dando lugar a aumentos o disminuciones de su concentración en el líquido intersticial. El metabolismo es, por tanto, la causa de la creación de gradientes y del movimiento de las moléculas a uno y otro lado de la pared capilar.*
- b) *Pinocitosis o transporte vesicular. Las vesículas permiten realizar procesos de endo y exocitosis constituyendo verdaderos **canales transcelulares de transporte**.*
- c) *Ultrafiltración. Reparto de líquidos. Este tipo de transporte tiene como función básica la redistribución de líquidos extracelulares. El líquido extracelular está formado básicamente por dos componentes: el plasma, con un volumen de 3 litros, y el líquido intersticial, con un volumen aproximado de unos 10 litros. El líquido intersticial puede ser utilizado como reservorio o almacén, pudiendo recibir líquido del plasma o bien proporcionándose al mismo.*

*El plasma tiene dos tipos de solutos:*

1. *Solutos de bajo peso molecular, que atraviesan sin ninguna dificultad la pared capilar y, por tanto, tienen la misma concentración a ambos lados.*
2. *Solutos de alto peso molecular o coloides: las proteínas, incapaces de atravesar la pared y que se encuentran en elevada concentración dentro del capilar (6-8 g/100ml), y baja en el líquido intersticial (0,7-2 g/100ml).*

*La magnitud de este flujo y el hecho de que el capilar no se vacíe viene determinado por las fuerzas que intervienen en el equilibrio de Starling. A través de este equilibrio, existe un movimiento de líquido sin modificación de las concentraciones de solutos de bajo peso molecular, a un lado y otro. Sin embargo, las cantidades (volumen) tanto de agua como de solutos cambiarán en función de la dirección preferente del flujo.*

### **7.2.2 Equilibrio de Starling**

*Este equilibrio describe como se mantienen los volúmenes distribuidos correctamente. Los movimientos de agua en el lecho capilar se desarrollan en ambos sentidos, mediante dos sistemas de fuerzas opuestas, las presiones hidrostáticas y coloidosmóticas, que se establecen a través de la pared capilar.*

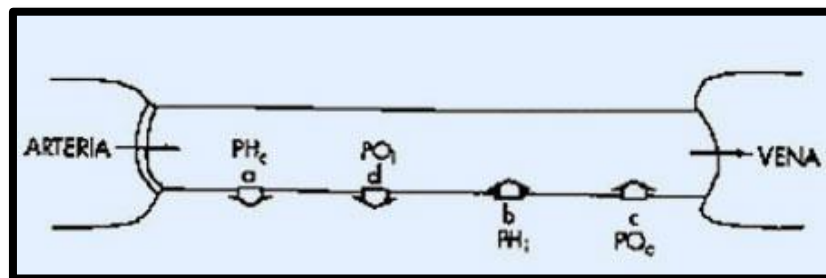
Existen dos gradientes contrarios de presión que son: uno hidrostático, ejercido por el líquido, y otro coloidosmótico dependiente de las proteínas. De acuerdo con estas diferencias, el movimiento depende de cuatro variables individuales que son las siguientes:

- *Presión hidrostática capilar ( $P_{hc}$ ). Cuando la sangre llega al extremo arterial del capilar la presión hidrostática o arterial es de 35 mm de Hg. y, como el capilar también ofrece cierta resistencia al flujo, la presión sigue descendiendo y en el extremo venoso del mismo la presión ha caído a 16 mm Hg.*
- *Presión hidrostática intersticial ( $P_{hi}$ ). Es la presión que ejerce el líquido intersticial. Su medida es compleja y se asume que su valor es 0 mm Hg., aunque en algunos tejidos se han obtenido valores subatmosféricos o negativos que oscilaban entre -3 y -9 mm Hg., debido probablemente al drenaje linfático.*
- *Presión osmótica, coloidosmótica, u oncótica capilar ( $p_c$ ). Es la presión desarrollada por las proteínas plasmáticas. El efecto osmótico de estos solutos empuja al agua hacia el interior del vaso. Su valor es de aproximadamente 28 mm Hg.*
- *Presión osmótica o coloidosmótica intersticial ( $p_i$ ). Es la presión que ejercen las proteínas del líquido intersticial. Como su concentración es mucho más baja que la plasmática (1-2 g/dL), su valor es de 3 mm Hg.*

La combinación de estas cuatro presiones a lo largo del recorrido capilar permite analizar los movimientos, totalmente pasivos de líquidos, que tienen lugar y que son dependientes de la siguiente ecuación:

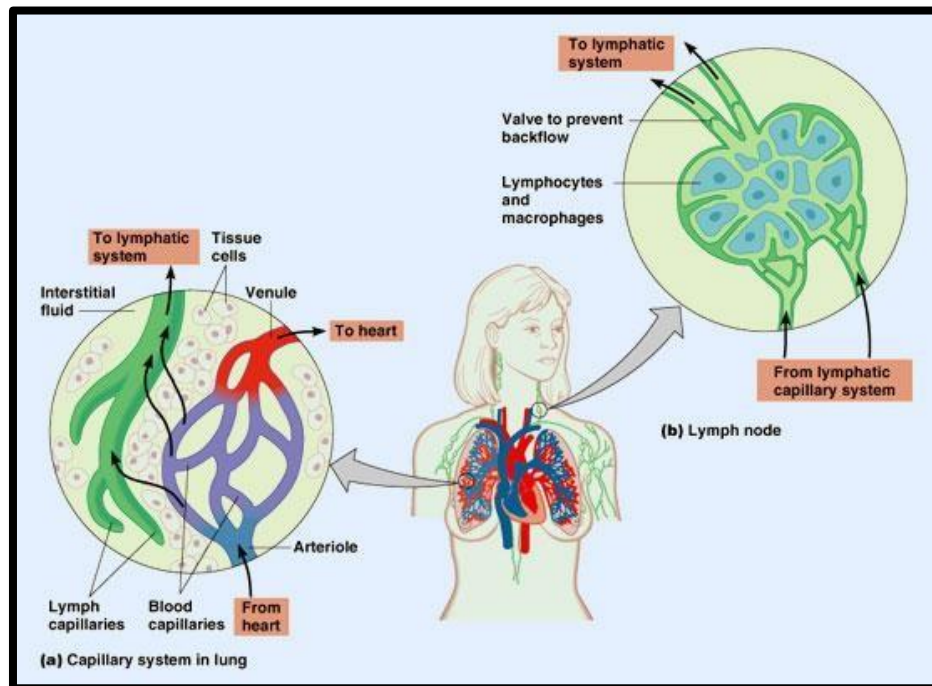
$$P_F = (P_{hc} + pI) - (P_{hi} + pC)$$

Donde  $P_F$  se define como **presión eficaz o neta de filtración** y se define como la diferencia de presiones que empujan el líquido hacia fuera ( $P_{hc} + pI$ ), y las presiones que empujan hacia adentro ( $P_{hi} + pC$ ).



Fuente: [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/732/mod\\_page/content/1/Imagen7.3.jpg](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/732/mod_page/content/1/Imagen7.3.jpg)

- a) Flujo en el extremo arterial del capilar. En esta región el sumatorio de presiones que empujan el líquido hacia el exterior del capilar es superior al sumatorio de las que lo empujan hacia el interior. La diferencia da como resultado una presión eficaz de filtración de 10 mm Hg. Por lo tanto en esta primera porción del capilar se produce la **filtración** o salida de líquido hacia el espacio intersticial.
- b) Flujo en el extremo venoso del capilar. En este punto la diferencia de presiones se invierte siendo el sumatorio de presiones hacia el exterior inferior al sumatorio de presiones hacia el interior. El resultado final da una presión eficaz de filtración de  $-9$  mm Hg, lo que indica una "filtración inversa" o movimiento de líquido hacia el interior del vaso definido como **absorción o reabsorción**.



Fuente: [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/732/mod\\_page/content/1/Imagen7.4.jpg](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/732/mod_page/content/1/Imagen7.4.jpg)

Así, ambos procesos tienden a compensarse; sin embargo, debido a que las presiones netas no son iguales existe un flujo mayor de filtración que de absorción. En términos porcentuales, del 100% de filtrado (20 litros/día), se absorbe el 90% (18 litros/día) a través de la región venosa del capilar, y el 10% restante (2 litros/día) será recogido por el sistema linfático.

Una cuestión que debe remarcar es que la filtración y absorción a nivel capilar no desempeñan un papel significativo en el intercambio de nutrientes y productos de desecho, ya que la principal fuerza de empuje para ambos, no es el gradiente de presiones, sino el gradiente de concentraciones.

Comparativamente las cantidades que se mueven, a través de filtración y absorción, son muy pequeñas.

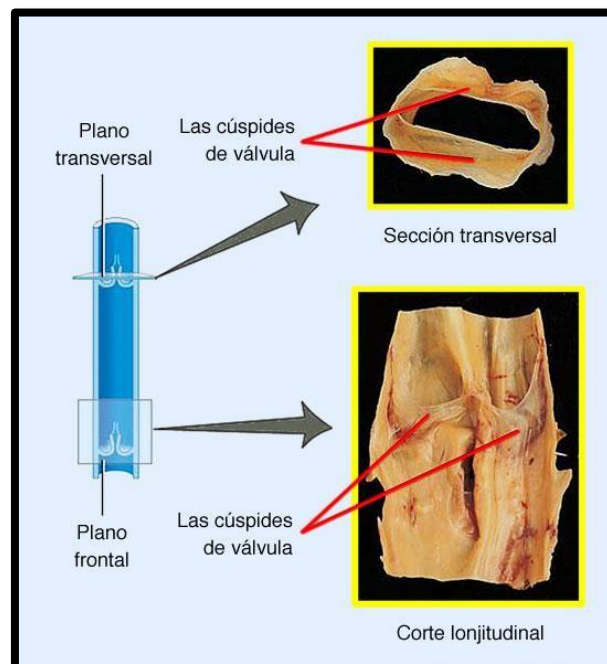
## 8. Circulación venosa y linfática

La circulación venosa es la porción del aparato circulatorio que recoge la sangre desde los capilares, y la devuelve al corazón para que continúe su recorrido en nuevos ciclos circulatorios. Por su parte, el sistema linfático, aunque no forma parte explícita del sistema cardiovascular, constituye un sistema de recuperación de líquidos o drenaje necesario para el equilibrio hídrico a nivel tisular, y por ello queda *incluido en el estudio de esta región del aparato circulatorio*.

### 8.1 Circulación venosa

#### 8.1.1 Estructura y funciones de las venas

La función principal del sistema venoso es permitir el retorno de la sangre desde el lecho capilar hasta el corazón. Comienza en las vénulas de la microcirculación, para ir convergiendo, en vasos de calibre cada vez mayor, hasta terminar en las venas cavas, de 3 cm. de diámetro. Estructuralmente, las venas son vasos de paredes más delgadas, con un menor contenido en fibras musculares y elásticas que las arterias, con una sección transversal normalmente elíptica y con un diámetro superior al de la arteria correspondiente. Estas características determinan que son vasos de baja resistencia.



Fuente: [34https://ocw.unican.es/pluginfile.php/733/mod\\_page/content/1/Imagen8.1.jpg](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/733/mod_page/content/1/Imagen8.1.jpg)

Fotografías de las válvulas de una vena.

*Por otro lado, al ser fácilmente distensibles poseen una gran capacidad para almacenar y liberar importantes volúmenes de sangre hacia la circulación sistémica. Entre el 60% y el 70% de la sangre de todo el sistema cardiovascular está almacenado en la porción venosa, la mayor parte en las venas de menos de 1 mm de sección.*

### **8.1.2 Diferencias con el sistema arterial**

*La naturaleza física de las venas es considerablemente diferente de las arterias y arteriolas, lo que permite establecer algunas diferencias como las siguientes:*

- a) El mayor calibre y la gran distensibilidad de la pared venosa permiten a este sistema almacenar la mayor parte de sangre circulante, de un 60% a un 70% frente al 20% del sistema arterial. Por ello, estos vasos son denominados de **capacitancia**.*
- b) La presión venosa es más baja que la arterial, siendo en la aurícula derecha de 0 mm Hg. En el lado arterial, para manejar tan sólo el 20% de volumen, se utilizan presiones bastante más altas, de aproximadamente 100 mm Hg.*
- c) Debido a la baja resistencia que ofrecen y a su mayor diámetro, la velocidad es más baja que en el sistema arterial, con valores de 10 a 15 cm/seg.*
- d) Las venas disponen de válvulas (repliegues de la túnica íntima), dispuestas aproximadamente cada 2-4 cm, con sus bordes orientados hacia el corazón, lo que implica que el flujo en el interior de estos vasos no circule de forma retrógrada y vaya siempre hacia la aurícula derecha.*
- e) El músculo liso es responsable del tono venoso, que permite la adaptación del sistema venoso a los cambios de volumen sanguíneo.*
- f) El nivel de ramificación del sistema venoso es mayor que el de la red arterial, formando plexos venosos, como el cutáneo, que permiten una reserva de circuito importante, pudiendo eliminar una parte del mismo sin causar alteraciones circulatorias.*

### **8.1.3 Estudio de la distensibilidad venosa: relación presión-volumen en el sistema venoso**

*La distensibilidad nos relaciona las variaciones del volumen contenido en una vena en función de la presión.*

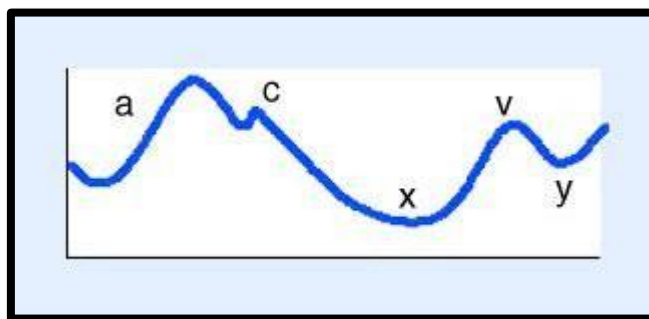
### 8.1.4 Tipo y velocidad de flujo en el sistema venoso

En las vénulas y pequeñas venas existe un flujo continuo, continuación del capilar. En las venas de tipo medio se observan oscilaciones de presión y flujo. En las grandes venas, el flujo es intermitente y las oscilaciones de presión se estudian bajo la denominación de pulso venoso.

La velocidad media de flujo aumenta, comparativamente con el lecho capilar, debido a la disminución de la sección transversal total; sin embargo, no se alcanzan los valores del árbol arterial porque las secciones venosas son mayores. En reposo, la velocidad media es de 10-15 cm/seg, pudiendo incrementarse hasta 50 cm/seg en condiciones de ejercicio.

### 8.2 Pulso venoso

Aunque en las vénulas el flujo es continuo y no existe pulsatilidad, en las grandes venas próximas al corazón hay oscilaciones de presión y volumen que reflejan las variaciones de presión en la aurícula derecha y que, transmitidas retrógradamente, se las denomina pulso venoso.



Fuente: [35https://ocw.unican.es/pluginfile.php/733/mod\\_page/content/1/Imagen8.2.jpg](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/733/mod_page/content/1/Imagen8.2.jpg)

En un registro de pulso venoso yugular pueden apreciarse varias ondas. La contracción auricular es responsable de la aparición de la onda positiva "a", y la siguiente onda, "c", se produce por protrusión de la válvula tricúspide en la aurícula al contraerse el ventrículo. La depresión u onda negativa "x" aparece por el desplazamiento del plano valvular hacia la punta cardíaca en el momento de la eyección. La relajación del ventrículo durante el período en que aún están cerradas las válvulas aumenta la presión auricular y hace aparecer la onda "v"; y, por último, la apertura de las válvulas y el flujo de sangre hacen disminuir la presión auricular, causando la onda negativa "y".

### 8.3 Presión venosa

Las venas constituyen un sistema de baja presión, la resistencia al flujo de sangre es pequeño y consecuentemente la fuerza de empuje necesaria, para que la

*sangre recorra esta segunda porción del aparato circulatorio, no es muy elevada.*

### **8.3.1 Presión venosa central**

*La presión en la aurícula derecha, donde drenan todas las venas sistémicas, se denomina presión venosa central y las presiones en el resto de las venas dependen de este valor de una forma muy directa. La presión en la aurícula derecha está determinada por:*

- a) El flujo sanguíneo desde los vasos periféricos hacia la aurícula.*
- b) La capacidad del corazón para expulsar sangre desde dicha aurícula.*

*Si la capacidad del corazón disminuye, la presión venosa se incrementa, y si el corazón expulsa sangre de forma enérgica, la presión disminuye. Por el mismo razonamiento, cualquier factor que incremente el flujo hacia la aurícula incrementa la presión venosa y un descenso de flujo disminuye la presión.*

*La presión venosa central es de 0 mm Hg, pudiendo elevarse en situaciones patológicas (insuficiencia cardíaca), y pudiendo disminuir hasta -4 o -5 mm Hg cuando el corazón trabaja mucho o cuando el flujo está muy disminuido (en el caso de una hemorragia).*

### **8.3.2 Presión venosa periférica**

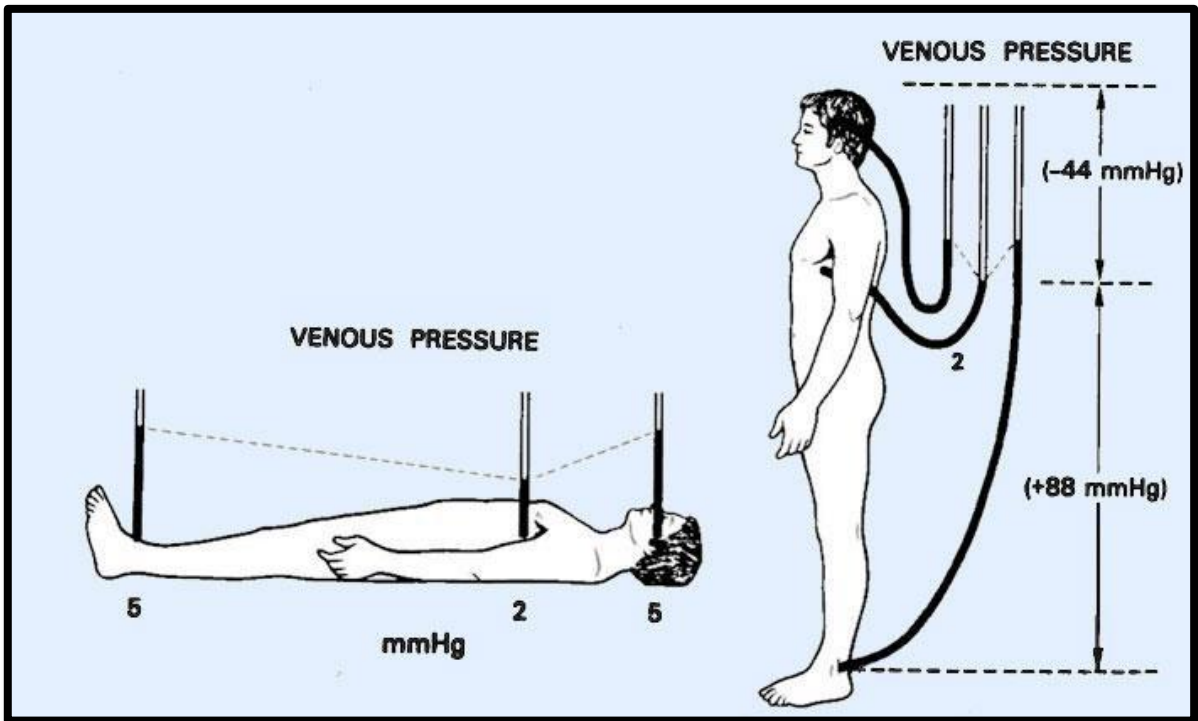
*Es la presión que se mide en el resto de las venas del sistema venoso. Su valor depende de varios factores:*

- a) La presión arterial.*
- b) La presión tisular.*
- c) La presión hidrostática gravitatoria el peso de la columna de sangre por efecto de la fuerza de gravedad modifica la presión periférica.*

*Cuando la presión venosa central se eleva por encima de los 0 mm Hg, la sangre comienza a remansarse en los grandes vasos abriendo todos los puntos de colapso. Existe, por tanto, un margen de seguridad bastante amplio, antes de que se eleve la presión venosa periférica.*

*Un aumento de la presión venosa periférica tiene como repercusión una disminución del volumen reabsorbido en los lechos capilares, lo que podría reducir el volumen sanguíneo hasta un 5%. Esta disminución, sin embargo, se ve contrarrestada por el aumento de la presión del líquido intersticial, que reduce la filtración desde el capilar y aumenta el drenaje linfático.*

### 8.3.3 Efecto de la gravedad sobre la presión venosa



Fuente: [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/733/mod\\_page/content/1/Imagen8.3.jpg](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/733/mod_page/content/1/Imagen8.3.jpg)

La presión en el interior del vaso depende de la presión hidrostática gravitatoria, es decir el peso de la sangre por efecto de la gravedad, y la presión hidrostática del líquido que fluye por la vena. Al ser ésta última muy pequeña, la primera determina en muchos casos el nivel de gradiente transmural y, por lo tanto, el grado de llenado o repleción que presenta el vaso. Por esto mismo, el efecto de la posición del cuerpo es muy importante en los valores de presión.

El sistema cardiovascular está sometido al campo de la gravedad y, por tanto, a presiones hidrostáticas gravitatorias que aumentan las presiones desarrolladas por el corazón de manera proporcional a la distancia de los vasos al corazón, incrementándose por debajo del mismo y disminuyendo por encima del nivel cardíaco. El efecto de la gravedad por lo tanto es antagónico, y depende, de si las venas están por encima o por debajo del corazón.

La influencia gravitatoria es uniforme en todos los vasos, tanto arterias como venas, de tal manera que la presión de empuje no se modifica. Sin embargo, los efectos son mucho más acentuados en vénulas y capilares incrementando, en algunos territorios, por ejemplo: las piernas, donde la filtración puede dar lugar a hinchazones que se revierten cuando se elimina el efecto de la gravedad, es decir, al tumbarse o al menos elevar las piernas horizontalmente.

*En la transición de la posición de decúbito a la de pie, un volumen de 400-600 ml de sangre caen a las venas de las piernas procedentes de otros territorios vasculares, originando desplazamientos de volúmenes de sangre relativamente grandes que tienen efectos sobre la función circulatoria general.*

### **8.3.4 Valoración de la presión venosa**

*La presión venosa puede valorarse mediante observación directa del grado de distensión de las venas periféricas. Las venas del cuello constituyen un punto de observación relevante por el hecho de que nunca están distendidas cuando la persona normal está sentada. Si la presión central se eleva, las venas comienzan a hacer protrusión. La ingurgitación de la yugular indica un aumento de la presión venosa central que es transmitida hasta dichas venas por vía retrograda. La medición de la presión en la aurícula se realiza a través de un catéter introducido en una vena y llevado hasta la aurícula.*

## **8.4 Retorno venoso**

*El retorno venoso se define como la cantidad de sangre que fluye desde las venas hacia la aurícula derecha cada minuto, empujada por un gradiente medio de presión de unos 10 mm Hg. Al formar parte de un circuito cerrado la entrada a la bomba debe balancearse estrechamente con la salida o gasto cardíaco.*

*El retorno venoso depende de:*

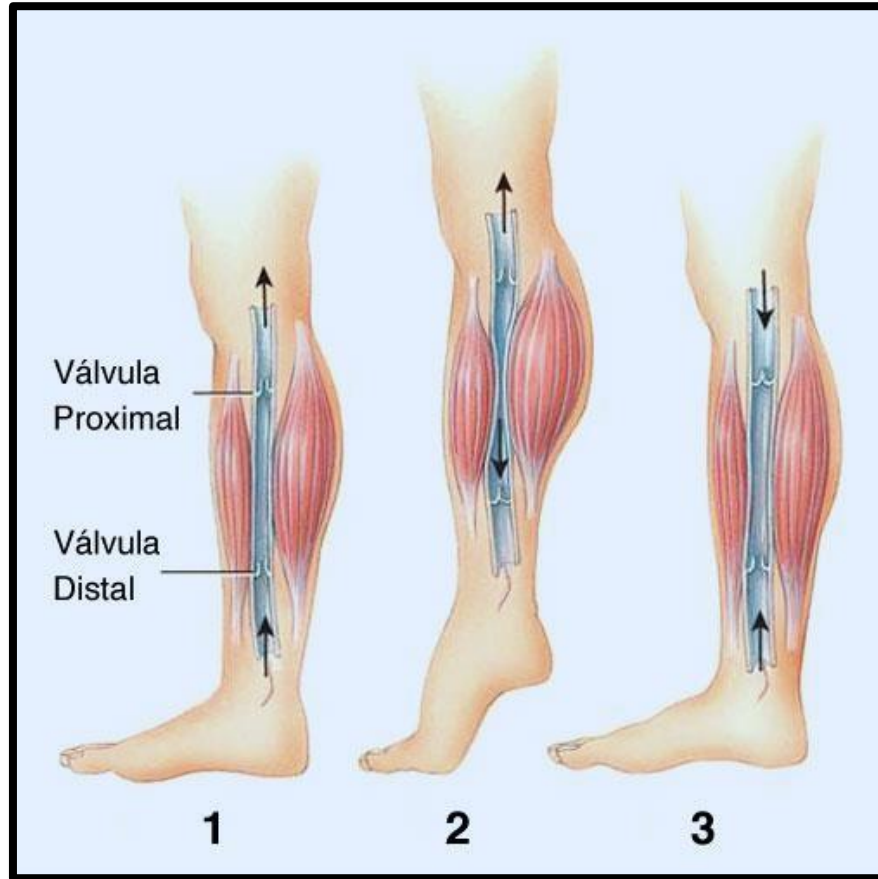
- a) El gradiente de presión: presión venosa periférica – presión venosa central.*
- b) La resistencia al flujo.*

### **8.4.1 Fuerzas responsables del retorno venoso**

*Como el gradiente de presión es muy pequeño, el sistema venoso dispone de varios mecanismos de bombeo que colaboran en el retorno de la sangre hasta el corazón.*

### **8.4.2 Bomba muscular**

*La presencia de las válvulas en las venas garantiza que la dirección del flujo de la sangre sea únicamente hacia el corazón. La presión desarrollada durante la contracción muscular colapsa los troncos profundos y debido a la posición de las válvulas la sangre es empujada hacia la aurícula derecha, reduciendo la presión venosa. Cada contracción muscular apoya por tanto el flujo normal empujando la sangre contenida en la vena, y actuando sobre las válvulas abriendo la situada en sentido ascendente y cerrando la precedente.*



Fuente: [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/733/mod\\_page/content/1/Imagen8.4.jpg](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/733/mod_page/content/1/Imagen8.4.jpg)

La combinación de las válvulas venosas y la contracción muscular esquelética constituyen una bomba (a veces denominada corazón externo) que ayuda al corazón a mantener el flujo unidireccional de sangre a través del aparato circulatorio.

### 8.4.3 Bomba respiratoria

Los movimientos respiratorios constituyen un factor que favorece al retorno venoso.

Durante la fase inspiratoria, la presión intratorácica disminuye haciéndose inferior a la atmosférica; como las venas del cuello están sometidas a presión atmosférica, se ejerce un efecto de succión sobre las mismas, pasando la sangre hacia las cavas y en último lugar hacia el corazón. En las venas inferiores, el efecto de la depresión del diafragma en la inspiración provoca un aumento de presión intraabdominal facilitando el flujo venoso hacia el tórax, ya que el refluo a las venas de las piernas es impedido por las válvulas venosas.

Por el contrario, durante la espiración los cambios se invierten y la presión en el interior del tórax aumenta hasta aproximarse a la atmosférica, aunque siempre

permanece inferior a la abdominal; en este caso se disminuye la entrada de sangre venosa hacia el tórax.

#### 8.4.4 Bomba cardíaca

La actividad muscular del corazón no solo sirve para empujar la sangre al circuito; también tiene una función aspirante facilitadora del retorno venoso. La disminución de la presión en la aurícula derecha aumenta el retorno venoso.

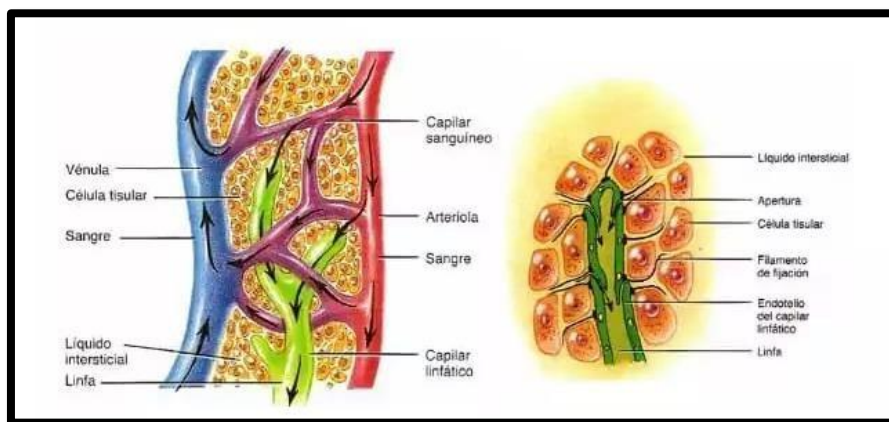
### 8.5 Circulación linfática

El sistema linfático es una red de vasos junto con pequeños órganos, los ganglios linfáticos; que sin formar parte, estrictamente, del sistema cardiovascular, colabora junto con el sistema venoso en la recuperación del excedente filtrado a nivel tisular y, consecuentemente, en el mantenimiento del equilibrio hídrico en el organismo.

Toda la linfa procedente de la parte inferior del cuerpo llega al conducto torácico y se vacía en el sistema venoso en la unión de la yugular interna izquierda con la subclavia. La linfa de la mitad izquierda de la cabeza y el cuello, del brazo izquierda y partes del tórax también llega al conducto torácico. La linfa que procede de la mitad derecha de la cabeza y el cuello, del brazo derecho y partes del tórax es conducida por el conducto linfático derecho, que desemboca en la confluencia de la yugular interna derecha y la subclavia del mismo lado.

#### 8.5.1 Estructura y función de los vasos linfáticos

Los capilares linfáticos comienzan en fondos de saco, y van uniéndose y estableciendo anastomosis, formando vasos linfáticos cada vez mayores que se dirigen hacia ganglios linfáticos y terminando en los conductos torácico y linfático derecho.



Fuente: [38https://www.fisioterapiaadomicilio.es/wp-content/uploads/sistema-linfatico-vasos-linfaticos.jpg](https://www.fisioterapiaadomicilio.es/wp-content/uploads/sistema-linfatico-vasos-linfaticos.jpg)

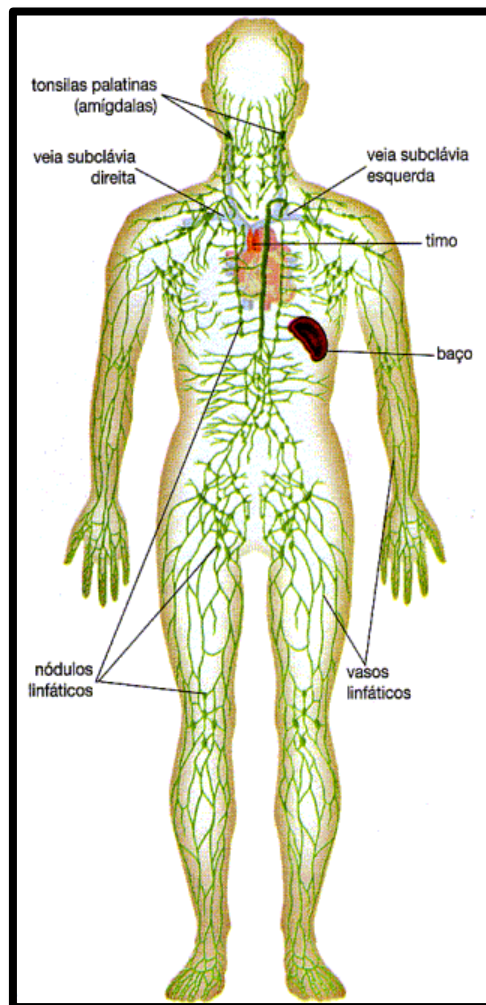
Al igual que los capilares sanguíneos, están formados por una capa de células endoteliales; sin embargo, se diferencian de ellos, por la gran cantidad de canales (o hendiduras intercelulares) que presenta la pared.

### 8.5.2 Formación de la linfa

La linfa es líquido intersticial que penetra en los vasos linfáticos, por ello, su composición es idéntica a la del líquido intersticial de la parte del cuerpo de la que provienen. Es una solución cuya composición variará dependiendo del territorio donde se forme. La linfa que llega al sistema venoso es al fin una mezcla de la procedente de todos los territorios, tiene un color amarillento y capacidad de coagularse ya que contiene fibrinógeno.

### 8.5.3 Flujo linfático

Debido a que este sistema carece de bomba impulsora, el flujo depende enormemente de las fuerzas externas.



Fuente: [39https://residenciasalcalamahora.files.wordpress.com/2013/10/linfatico.gif](https://residenciasalcalamahora.files.wordpress.com/2013/10/linfatico.gif)

Los mecanismos que determinan que la linfa fluya son varios, unos intrínsecos en el propio diseño del sistema y otros extrínsecos, como los descritos para el sistema venoso.

- a) *Bomba linfática capilar. Un incremento en la entrada de líquido intersticial produce un aumento concomitante de flujo linfático.*
- b) *Bomba linfática vascular. La presencia de fibras musculares lisas ejerce una acción bombeadora debida a las contracciones rítmicas y espontáneas.*
- c) *Bomba muscular y respiratoria. La contracción de la musculatura esquelética comprime los vasos linfáticos actuando como una bomba externa para el flujo linfático.*
- d) *Pulsaciones arteriales. En vasos linfáticos de trayecto contiguo a arterias, la onda de pulso arterial puede comprimir su pared ayudando al avance de la linfa.*
- e) *Compresiones externas. La compresión desde el exterior, mediante vendajes o medias, de cualquier parte del organismo facilita el flujo linfático.*

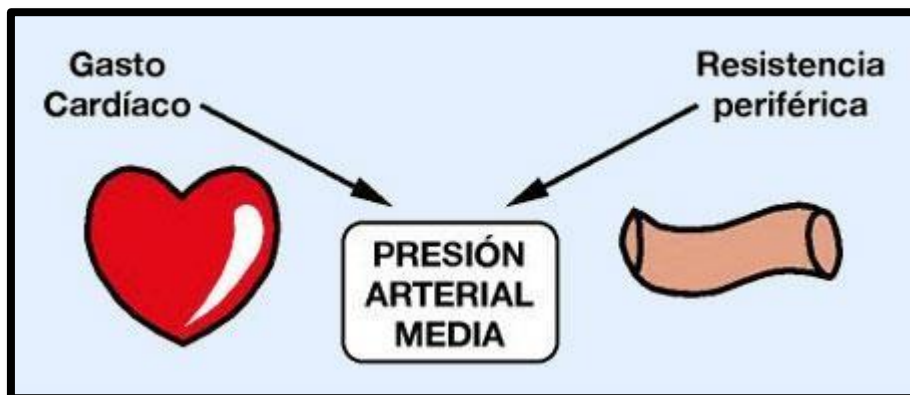
## 9. Regulación del aparato circulatorio

### 9.1 Esquema General

El sistema cardiovascular, al igual que el resto del organismo, está regulado por mecanismos homeostáticos retroactivos que miden una serie de variables y generan respuestas tendentes a mantener constantes dichas variables.

Dentro de este sistema existen dos niveles de control:

- a) *Control local, en el que las variables medidas son parámetros locales de la zona regulada, y los efectores que darán origen a la respuesta también son locales.*
- b) *Control central, que sirve para ajustar todo el sistema.*



Fuente: [40https://ocw.unican.es/pluginfile.php/734/mod\\_page/content/1/Imagen9.1.jpg](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/734/mod_page/content/1/Imagen9.1.jpg)

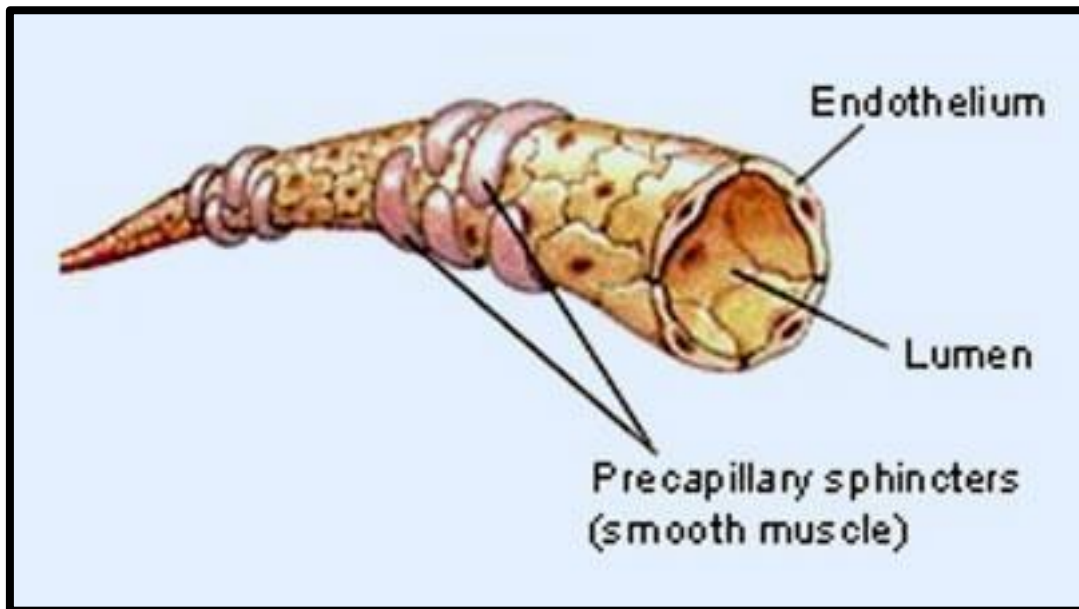
La ecuación básica en el control del sistema cardiovascular es la siguiente:

$$\text{Flujo} = \frac{\text{Presión}}{\text{Resistencia}}$$

De las dos variables (presión y resistencia) que podrían controlarse, la utilizada es la presión arterial. Para que la función del sistema cardiovascular se lleve a cabo se hace necesario que la presión arterial se regule con precisión. Ha de mantenerse dentro de un rango que permita un flujo sanguíneo adecuado a todos los tejidos orgánicos en función de sus necesidades.

## 9.2 Mecanismo de control humoral y nervioso del flujo sanguíneo

La regulación del sistema vascular se realiza básicamente sobre el músculo liso vascular y, más concretamente, sobre el músculo liso de las arteriolas, ya que éstas constituyen el punto máximo de resistencia. La relajación del músculo liso aumenta el radio arteriolar (**vasodilatación**) y su contracción lo disminuye (**vasoconstricción**). Este músculo está bajo control del sistema nervioso autónomo y de determinadas hormonas.



Fuente:

41data:image/jpeg;base64,/9j/4AAQSkZJRgABAQAAQABAAD/2wCEAAoHCBUVFRgRFRQZGRgaGhkZGRoaHBwchBkhHyUZGh8fHB4clS4IHSErHxgcJjgnKy8xNTc2GiQ7QDszPy40NTEBDawMEA8QHhISHzErlys0NDE0NDQ0NDQxNDE0MTQ0MTQ0MTQ0PTQ0NDQ0NDQ0NDQxNDQ0NDQ0NDQ0NDQ0NDQ0NDQ0NP/AABEIAKcBLgMBIgACEQEDEQH

### 9.2.1 Control humoral del flujo



Fuente: [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/734/mod\\_page/content/1/Imagen9.4.jpg](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/734/mod_page/content/1/Imagen9.4.jpg)

*Dentro de este apartado se engloba aquellas sustancias que, o bien formadas en glándulas específicas y transportadas por sangre, o bien formadas en tejidos específicos, producen efectos circulatorios. Se las puede clasificar en dos tipos, dependiendo de cuál sea el efecto causado sobre los vasos sanguíneos:*

#### **9.2.1.1 Sustancias vasoconstrictoras**

- a) Noradrenalina y adrenalina. La noradrenalina es un potente vasoconstrictor. La adrenalina también es vasoconstrictora en menor grado, pudiendo en algunos casos provocar vasodilatación, como en los vasos coronarios.*
- b) Angiotensina II. Es una de las sustancias vasoconstrictoras más potentes. Actúa fundamentalmente en las pequeñas arteriolas, y en condiciones normales su efecto es sobre todo el organismo, aumentando la resistencia periférica total y la presión arterial.*
- c) Vasopresina o ADH. Es la hormona vasoconstrictora más potente. Sólo se secreta en muy pequeñas cantidades y su papel es elevar la presión sanguínea de una forma muy eficaz.*
- d) Endotelinas. Péptidos con una potente acción vascular. Actúan de forma autocrina y paracrina. Sus células diana preferentes son las fibras musculares lisas subendoteliales.*

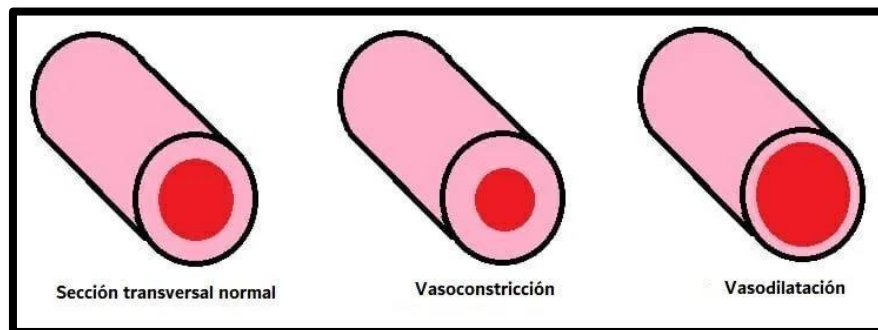
#### **9.2.1.2 Sustancias vasodilatadoras**

- a) Óxido nítrico (NO). Causan vasodilatación por relajación del músculo liso.*
- b) Factor hiperpolarizante endotelial (FHDE). Molécula derivada del ácido araquidónico, que es sintetizada por la célula endotelial.*

- c) *Bradicinina o sistema calicreína-cinina. Forma parte de una familia de polipéptidos, denominados cininas, obtenidos de las 2-globulinas del plasma. La acción de la bradicinina y de la calidina es una fuerte dilatación arteriolar y un aumento de la permeabilidad capilar*
- d) *Histamina. Es producida y liberada prácticamente en todos los tejidos que sufren una lesión; en su mayor parte la circulante procede de los mastocitos y los basófilos circulantes.*
- e) *Prostaglandinas. Algunas prostaglandinas provocan vasoconstricción (PGF) y otras, vasodilatación (PGA<sub>1</sub>, PGA<sub>2</sub>, PGE). Se cree que su función es muy local.*
- f) *Péptido auricular natriurético (PAN). Es un potente vasodilatador, secretado por varios tejidos, entre ellos la aurícula.*

### 9.2.2 Control nervioso

*En el sistema vascular todas las acciones están mediadas por el sistema nervioso autónomo simpático. Los nervios simpáticos tienen muchas fibras vasoconstrictoras y pocas vasodilatadores.*



Fuente: [43https://i0.wp.com/www.elgencurioso.com/wp-content/uploads/2021/05/Vasoconstriction-y-Vasodilation.jpg?ssl=1](https://i0.wp.com/www.elgencurioso.com/wp-content/uploads/2021/05/Vasoconstriction-y-Vasodilation.jpg?ssl=1)

*La inervación de pequeñas arterias y arteriolas permite incrementar su resistencia y modificar el flujo sanguíneo; en los grandes vasos, en concreto las venas, permite modificar su capacidad, alterando el volumen del sistema circulatorio periférico y proyectando más sangre hacia el corazón.*

#### 9.2.2.1 Tono miogénico o basal

*Las fibras simpáticas que inervan las fibras musculares vasculares mantienen un ritmo de descarga continua (tónica) de 1-3 impulsos por segundo. Estos impulsos mantienen un estado de contracción parcial de los vasos sanguíneos que se conoce como tono vasomotor. Puede lograrse mayor o menor nivel de contracción, mediante un aumento o disminución de la frecuencia de descarga con respecto al nivel.*

## 9.3 Tipos de regulación

### 9.3.1 Regulación local

Cada tejido es capaz de regular su propio flujo sanguíneo según sus necesidades específicas. En términos generales, cuanto mayor sea la tasa metabólica de un tejido mayores serán sus requerimientos de flujo. Existen, sin embargo, algunos órganos (riñón o cerebro) que necesitan flujos elevados y constantes para realizar sus funciones, de ahí que en ellos se observen cambios relativamente pequeños de flujo.

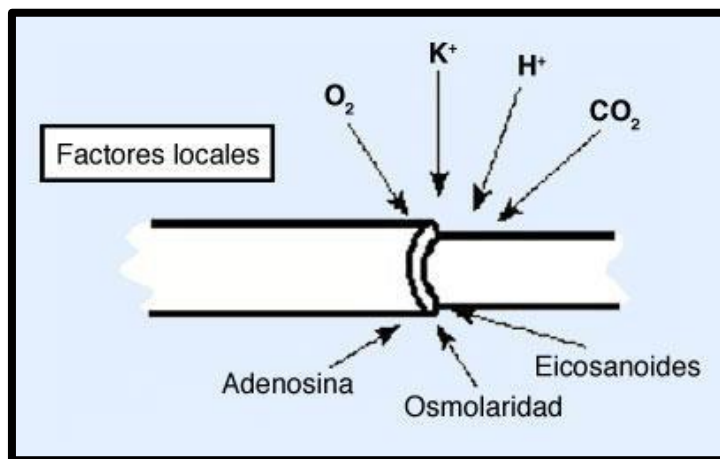
El flujo sanguíneo está regulado localmente de una manera muy estricta, impidiendo en cada momento que haya excesos o defectos de irrigación, y manteniendo el trabajo mínimo para todo el sistema.

La regulación local puede ser:

- A corto plazo: cambios rápidos que se instauran en un plazo de tiempo corto, de segundos a minutos.
- A largo plazo: cambios más lentos que van apareciendo a lo largo de días, semanas o meses.

#### 9.3.1.1 Regulación local a corto plazo: efecto del metabolismo tisular

El aumento del metabolismo en un tejido incrementa el flujo sanguíneo. La variable principal, que se mide localmente, es la disponibilidad de oxígeno. Cuando esta disponibilidad disminuye hasta un 25%, el riego sanguíneo aumenta hasta tres veces. El incremento del metabolismo o la caída del oxígeno hace que las células secreten sustancias vasodilatadoras, dentro de las cuales se encuentran:  $\text{CO}_2$ , adenosina y compuestos de fosfato de adenosina, iones potasio, ácido láctico, iones hidrógeno e histamina.



Fuente: [44https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSiM7jzvdwPzlrT3jH1HDuTW7o1YtDJcZCBTg&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSiM7jzvdwPzlrT3jH1HDuTW7o1YtDJcZCBTg&usqp=CAU)

*La sustancia vasodilatadora más potente es la adenosina. Se ha comprobado que un aumento de actividad cardíaca produce una mayor degradación de ATP, y una mayor formación de adenosina. Parte de esta adenosina escapa de las células y ejerce su acción en los vasos.*

*Diferentes circunstancias cursan con una regulación local del flujo sanguíneo a corto plazo, como son:*

- a) Hiperemia activa.*
- b) Hiperemia reactiva.*
- c) Regulación local ante cambios de la tensión arterial.*

*El mecanismo de la autorregulación consiste básicamente en lo siguiente: un descenso de la tensión arterial disminuye el flujo, lo que causa un descenso de  $O_2$  y un aumento de  $CO_2$ ,  $H^+$  y metabolitos, que no son arrastrados por la sangre tan rápidamente como en condiciones basales y aumenta la vasodilatación.*

### **9.3.1.2 Regulación local a largo plazo**

*El mecanismo a largo plazo consiste en un cambio en el número y calibre de los vasos en un territorio concreto. Si el metabolismo se eleva durante largo tiempo, se produce un aumento de vascularización; si disminuye, la vascularización se reduce. Igualmente, si existe un incremento de presión arterial, la vascularización disminuye, y si la presión arterial desciende, se incrementa la vascularización. La reconstrucción es por tanto continua.*

## **9.3.2 Regulación central**

*En la regulación integral del sistema cardiovascular se realiza el reparto equilibrado de flujo a cada uno de los órganos. La variable básica en el funcionamiento de dicho sistema es la tensión arterial o fuerza responsable principal de que el flujo sanguíneo llegue a todos los órganos. Los mecanismos que se describen, a continuación, tienen como objetivo mantener la tensión arterial dentro de un rango de valores que garantice la homeostasis corporal y la supervivencia del organismo.*

### **9.3.2.1 Mecanismo de regulación central a corto plazo: reflejos de mantenimiento de la tensión arterial**

*Consisten básicamente en mecanismos nerviosos de retroalimentación negativa. Se caracterizan por actuar de forma muy rápida, comenzando su acción en unos segundos. La intensidad de las respuestas es fuerte pero se debilita en poco tiempo; así, la estimulación simpática es capaz de aumentar la presión dos veces en 5-15 segundos y la inhibición de la estimulación simpática puede disminuirla hasta la mitad en 40 seg.*



Los mecanismos de control que forman parte de esta regulación se inician por la activación de diferentes receptores sensoriales:

1. *Mecanismo de control de los barorreceptores. Los barorreceptores son receptores de presión situados en las paredes vasculares de las grandes arterias de la circulación mayor. El aumento de presión estira la pared y estimula los barorreceptores, que envían señales nerviosas hacia el sistema nervioso central, para que se desarrollen las correspondientes órdenes, a través del sistema nervioso autónomo, hacia la circulación y se restaure el valor normal de presión. Los barorreceptores no son estimulados por valores de tensión arterial entre 0 y 60 mm Hg; por encima de 60 mm Hg, responden rápidamente hasta un máximo de 180 mm Hg. La zona de máxima respuesta se sitúa en los límites normales de presión arterial, alrededor de 100 mm Hg, en la zona de máxima pendiente. **Esquema del reflejo barorreceptor:** ante un incremento de presión, se produce un incremento en la descarga nerviosa. Los efectos son: Vasodilatación de todo el sistema periférico y disminución de la frecuencia cardíaca y de la contractilidad. **Importancia del sistema barorreceptor:** el sistema barorreceptor es catalogado como un sistema tampón o amortiguador de la tensión arterial, ya que sin su presencia las modificaciones de la presión durante las actividades normales diarias serían muy grandes. Mientras está actuando compensa los cambios manteniendo los valores en unos límites muy estrechos, de alrededor de los 100 mm Hg. **Función de los barorreceptores en los cambios posturales:** al pasar del decúbito a la posición erecta, la tensión arterial de la cabeza y de la parte alta del cuerpo tiende a disminuir, pudiendo llegar a disminuir tanto el flujo que se pierda el conocimiento. La tensión que desciende origina un reflejo barorreceptor inmediato, que produce una fuerte descarga simpática en el organismo, reduciendo al mínimo esta bajada de tensión.*
2. *Mecanismo de control de los quimiorreceptores. Los quimiorreceptores son células sensibles a la disminución de oxígeno, al aumento de anhídrido carbónico y al aumento de hidrogeniones. Se encuentran situados en los cuerpos carotídeos y aórticos. Las señales son transmitidas al centro vasomotor a través de las mismas vías que las señales barorreceptoras. Estimulan el centro vasoconstrictor provocando, de forma refleja, un incremento de la tensión arterial.*
3. *Mecanismo de control de los receptores de estiramiento. En las aurículas, en arterias pulmonares, en venas cavas y también en ventrículos existen unos receptores denominados de baja presión, que intervienen en la amortiguación de la tensión arterial como respuesta a los cambios de volumen. No pueden detectar cambios de la tensión arterial general, pero sí cambios de presión causados por un aumento de volumen (también se les*

conoce como *volorreceptores*) en las zonas de baja presión de la circulación.

4. *Mecanismo de control por el propio centro vasomotor. Respuesta isquémica del sistema nervioso central. Cuando la presión desciende y el flujo sanguíneo en el centro vasomotor disminuye lo suficiente como para causar una carencia nutricional (una isquemia), las propias neuronas responden directamente y sufren una intensa estimulación. Esto provoca un aumento intenso de la tensión arterial hasta valores máximos.*

### **9.3.2.2 Regulación central a medio y largo plazo**

*Para regular la presión a largo plazo, el factor más importante que se controla es el volumen sanguíneo, que es uno de los determinantes de la tensión arterial. A medio plazo existen tres mecanismos que comienzan lentamente, en minutos, y se desarrollan completamente después de horas.*

- a) *Desplazamiento de volumen líquido en los capilares. Los incrementos de presión arterial o venosa, o ambas, aumentan los procesos de filtración capilar, elevando el volumen de filtrado y disminuyendo el volumen vascular, lo que da lugar a una disminución de la presión arterial.*
- b) *Relajación de los vasos por estrés. Los aumentos de presión arterial se contrarrestan parcialmente por la propiedad de los vasos de aumentar lentamente su distensibilidad.*
- c) *Sistema renina-angiotensina. Una disminución en el flujo renal dispara el sistema renina-angiotensina, dando lugar a angiotensina II.*

*Los mecanismos de regulación a largo plazo se basan en procesos que afectan al volumen líquido vascular. Aumentos de volumen causan incrementos de presión, e incrementos de presión provocan disminuciones de volumen. Los cambios de volumen se realizan mediante excreción de sales y agua por el riñón.*

## **Tema 1. Composición y funciones de la sangre**

### **1.1 Funciones específicas de la sangre**

*La sangre es una solución donde se encuentran solutos y células y que desarrolla funciones como las siguientes:*

- a) *Transporte. Transporta multitud de sustancias, disueltas y unidas químicamente a diferentes componentes. Según el compuesto transportado la función puede ser denominada:*
  1. *Respiratoria: Transporte de gases entre los tejidos y los pulmones.*

2. *Nutritiva: Distribución de nutrientes desde el intestino hasta los tejidos.*
  3. *Excretora: Transporte de productos de desecho del metabolismo desde el lugar de producción hasta el lugar de eliminación.*
- b)** *b) Homeostática. El control de parámetros tan importantes como el pH, la temperatura, el control del volumen hídrico o de los electrolitos corporales se realiza a través de la sangre.*
- c)** *c) Comunicación y defensa. El transporte de mediadores informativos como las hormonas y otros se lleva a cabo mediante la sangre. Lo mismo que la protección del organismo cuenta con algunas células y proteínas de la sangre que participan en los procesos de defensa orgánica contra invasión de gérmenes patógenos o para eliminación de cuerpos extraños.*

## **1.2 Características y composición de la sangre**

*Su densidad es ligeramente mayor a la del agua: 1,05-1,06. Su viscosidad es bastante mayor que la del agua (3,5-5) debido a la presencia de elementos celulares y a los solutos macromoleculares. El volumen de sangre que hay en un individuo se conoce con el nombre de **volemia**, siendo los valores normales (o **normovolemia**) aproximadamente un 7-8% del peso corporal (lo que equivale a 75 cc/kg). En recién nacidos estos valores son superiores, un 10%. Si estos valores están incrementados se considera una **hipervolemia**, y si están disminuidos una **hipovolemia**.*

*La composición de la sangre es la siguiente:*

- a)** *Células. O elementos formes que están en suspensión y ocupan alrededor del 46% del volumen.*
- b)** *Plasma o solución plasmática. Solución acuosa que ocupa alrededor del 54% del volumen sanguíneo.*



- a) *Solutos inorgánicos o electrolitos. Constituyen el 0,9% de los solutos y son básicamente los que se localizan en el líquido extracelular. Na<sup>+</sup>, Ca<sup>++</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>++</sup>, Cl<sup>-</sup>, PO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, etc.*
- b) *Solutos orgánicos. Glucosa, aminoácidos, enzimas, hormonas, vitaminas hidro y liposolubles, ácidos grasos, productos de desecho como urea, ácido úrico, creatinina, bilirrubina, etc.; y proteínas plasmáticas, las cuales constituyen el 7% de los solutos plasmáticos.*

## **1.4 Proteínas plasmáticas**

*Existen tres grupos de proteínas plasmáticas cuyos tamaños, estructuras y cantidades son muy variables, se clasifican en tres grupos principales:*

- *Albúminas, que constituyen el 59,2% del total de proteínas.*
- *Globulinas, que constituyen el 40,5% del total de proteínas.*
- *Fibrinógeno, que es aproximadamente el 0,3% del contenido proteico plasmático. Cuando es eliminado de la solución plasmática ésta recibe el nombre de suero o solución sérica.*

### **1.4.1 Funciones de las proteínas plasmáticas**

- a) *Mantenimiento de la presión coloidosmótica del plasma.*
- b) *Viscosidad sanguínea.*
- c) *Regulación del equilibrio ácido-base.*
- d) *Transporte de iones, ácidos grasos, esteroides, hormonas drogas, etc.*
- e) *Fuente de aminoácidos para los tejidos en caso de ayuno.*
- f) *Hemostasia.*
- g) *Defensa del organismo.*

### **1.4.2 Características y funciones de las más importantes**

*Uno de los sistemas de separación de los diferentes grupos de proteínas se realiza mediante electroforesis, que permite una separación por carga eléctrica. De esta forma quedan distribuidas en: albúminas, α<sub>1</sub>-globulinas, α<sub>2</sub>-globulinas, β-globulinas y γ-globulinas.*

- a) *Seroalbúminas o albúminas séricas. Se sintetizan en el hígado, presentan el menor tamaño y la mayor concentración. Actúan como transportadoras de lípidos y hormonas.*
- b) *Glucoproteínas. Proteínas con grupos glucídicos: hexosa, hexosamina, ácido siálico, etc.*

- c) *Lipoproteínas. Proteínas con grupos lipídicos. Sirven para el transporte de lípidos.*
- d) *Transferrina. Es una glucoproteína que se une al Fe<sup>++</sup> de forma reversible y lo transporta hasta la médula ósea.*
- e) *Haptoglobinas. Son globulinas que se unen a la hemoglobina, evitando la pérdida de Fe y protegiendo al riñón del daño de la hemoglobina.*
- f) *Ceruloplasmina. Es una globulina que fija Cu.*
- g) *Fetuína. Se encuentra en el feto y en el recién nacido, interviene en la proliferación celular.*
- h) *Factores de coagulación.*
- i) *Inmunoglobulinas. Intervienen en mecanismos de defensa.*
- j) *Reguladores hormonales de la hematopoyesis y de la granulopoyesis.*

## **Tema 2. Glóbulos rojos, eritrocitos o hematíes**

### **2.1 Características**

*Son células anucleadas en forma de disco bicóncavo, y las células más abundantes en sangre; su número varía en función de la edad, el sexo y la altura del hábitat. Por término medio:*

- *4.5- 10<sup>6</sup>/mm<sup>3</sup> en el varón.*
- *4-5- 10<sup>6</sup>/mm<sup>3</sup> en la mujer.*
- *5.9- 10<sup>6</sup>/mm<sup>3</sup> en el recién nacido.*



Fuente: [47https://ocw.unican.es/pluginfile.php/737/mod\\_page/content/1/Imagen2.1.jpg](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/737/mod_page/content/1/Imagen2.1.jpg)

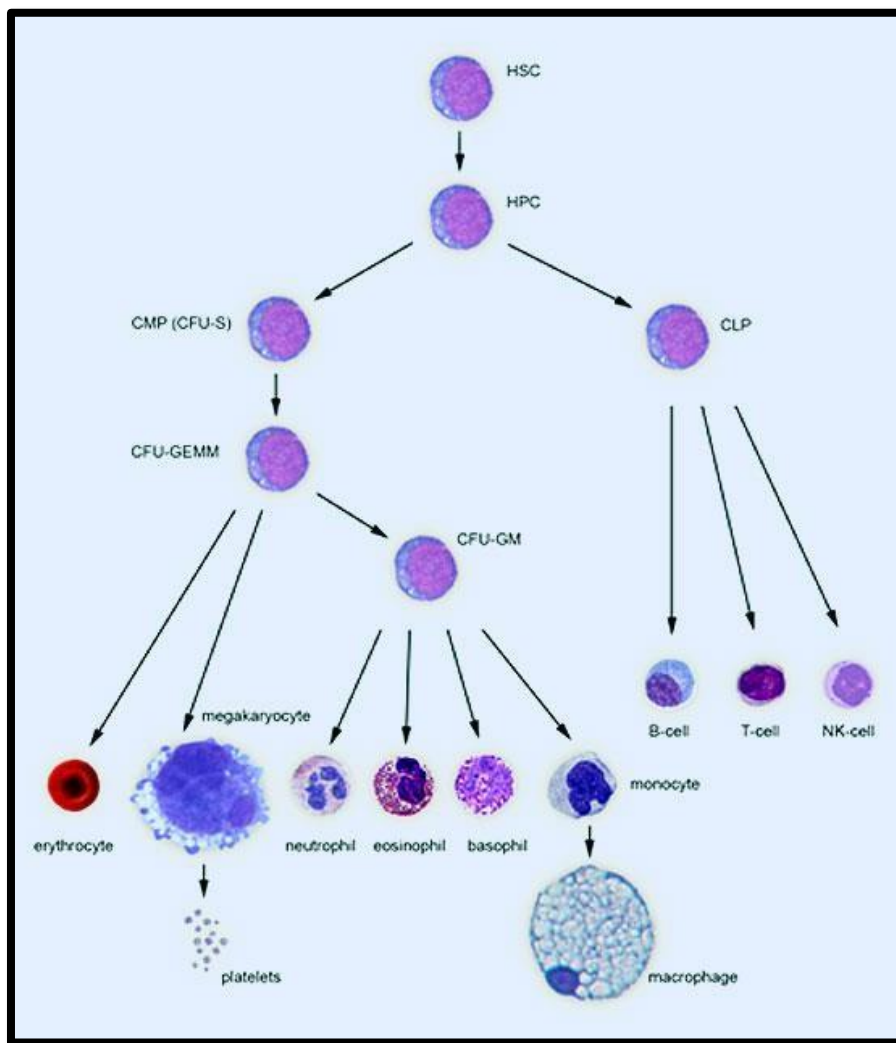
## Medidas:

1. Diámetro corpuscular (o globular) medio (DCM, DGM):  $7-7.5 \mu$
2. Volumen corpuscular (o globular) medio (VCM, VGM):  $87 \pm 5 \mu^3$
3. Área superficial:  $142 \mu^2$

## 2.2 Eritropoyesis

En la médula ósea roja en los huesos planos: esternón, pelvis, costillas, vértebras.

La tasa de formación es muy alta incorporándose por término medio a la corriente sanguínea unos  $180 \cdot 10^6$ /minuto, sustituyendo así a los eritrocitos eliminados y manteniendo la cantidad de los mismos prácticamente constante. El tiempo que se necesita para la formación de un eritrocito maduro oscila entre 4 y 7 días.



Fuente: [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/737/mod\\_page/content/1/Imagen2.2.jpg](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/737/mod_page/content/1/Imagen2.2.jpg)

*Partiendo de la célula primordial (también conocida como célula madre, indiferenciada, célula stem) que es la célula que da origen a todas las variedades de células sanguíneas la línea de diferenciación comienza para la serie roja en la multiplicación, dando lugar a los proeritroblastos, eritroblastos, normocitos, reticulocitos y eritrocitos.*

*En la sangre se encuentra ya una pequeña cantidad de reticulocitos, 5-25/1000 eritrocitos, cantidad que sirve para observar un correcto ritmo de eritropoyesis. La célula madura, el eritrocito es la célula que mayoritariamente abandona la médula ósea roja y se incorpora a la corriente sanguínea.*

### **2.2.1 Regulación de la eritropoyesis**

*El principal factor que determina la eritropoyesis es la oxigenación de los tejidos. Cuando por cualquier motivo disminuye la cantidad de oxígeno que llega a los tejidos, se produce un rápido incremento en el número de eritrocitos circulantes. Para llevar a cabo esta modificación en el ritmo de respuesta eritropoyética, se produce ante la falta de oxigenación en las células renales la secreción de factor eritropoyético renal que al unirse a una globulina plasmática sintetizada en el hígado forman la **eritropoyetina**.*

*En la regulación de la eritropoyesis también intervienen los niveles de vitamina B<sub>12</sub> (cianocobalamina), ácido fólico y de Fe. La carencia de estos factores determina un incorrecto desarrollo de la eritropoyesis, bien porque se formen células anómalas (la carencia de vitamina B<sub>12</sub> da lugar a células megaloblásticas) o porque se forme un número insuficiente.*

### **2.3 Función de los eritrocitos**

*La vida media de un eritrocito es de unos 120 días, durante los cuales recorre de forma aproximada unos 320 kilómetros. Su función básica es el transporte de hemoglobina ya que su citoplasma contiene mayoritariamente esta proteína encontrándose en una concentración aproximada del 35%. Teniendo en cuenta que en el exterior de la célula la concentración proteica plasmática es de un 7%, su metabolismo mínimo y anaerobio está destinado casi en exclusiva a mantener el equilibrio osmótico, mediante mecanismos de transporte a través de la membrana que impidan la entrada de agua y la correspondiente hemólisis.*

*Al carecer de núcleo y ribosomas no realiza síntesis proteica y su maquinaria enzimática le permite degradar glucosa de forma anaerobia, lo cual le aporta el suficiente ATP para mantener el transporte activo de iones que mantenga su equilibrio osmótico.*

## 2.4 Estudio de la hemoglobina

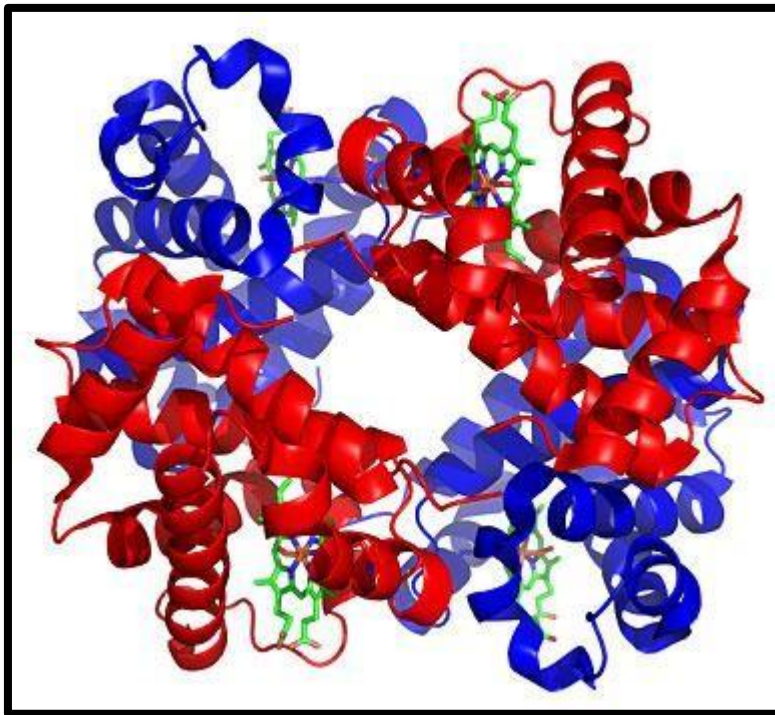
### 2.4.1 Cantidad de hemoglobina

15 g/dl de sangre en hombres y 14 g/dl en mujeres.

### 2.4.2 Síntesis y estructura de la hemoglobina

La hemoglobina es una proteína de estructura cuaternaria, formada por cuatro cadenas proteicas o globinas homólogas.

Hemoglobina A<sub>1</sub>: 2 cadenas  $\alpha$  (141 aminoácidos) y 2 cadenas  $\beta$  (146 aminoácidos). Cada cadena con un grupo prostético HEMO, que lleva unido un átomo de Fe.



Fuente: [49https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQjBWidSmCshtuealA1jcRssY0XfLdDDAj9ww&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQjBWidSmCshtuealA1jcRssY0XfLdDDAj9ww&usqp=CAU)

### 2.4.3 Función de la hemoglobina

Su función básica es el transporte de oxígeno. Se combina mediante una reacción laxa y reversible pasando a denominarse **oxihemoglobina**. Cada molécula de O<sub>2</sub> se al átomo de Fe, siempre que éste se encuentre en forma de ión ferroso (Fe<sup>++</sup>), ya que si el hierro se oxida y pasa al estado férrico o Fe<sup>+++</sup> la molécula denominada **metahemoglobina** no puede realizar la unión.

- Cada molécula de hemoglobina fija 4 moléculas de oxígeno (no iones) y el proceso de fijación o unión es cooperativo; esto es la unión de un oxígeno

facilita la incorporación de los siguientes, ya que aumenta la afinidad de la hemoglobina por el oxígeno.

- *Combinación con el monóxido de carbono: La hemoglobina presenta una gran afinidad por el monóxido de carbono o CO, superior (unas 210 veces) a la que presenta por el oxígeno; con lo que si el aire inspirado tiene tan sólo un 0,1% de CO, la hemoglobina queda saturada al 50% con dicho gas formando **carboxihemoglobina** que en el caso de alcanzar al 70-80% de saturación produce la muerte.*
- *Combinación con el dióxido de carbono: Aproximadamente el 10% del CO<sub>2</sub> que se transporta en sangre lo hace unido a la hemoglobina formando **carbaminohemoglobina**.*

## 2.5 Metabolismo del hierro

*El hierro constituye el elemento central de la molécula de hemoglobina, por eso sus niveles han de ser bien conservados en el organismo. La cantidad promedio que existe en el organismo es de unos 5 gr, que se reparte en tres compartimentos: el circulante: Fe unido a su proteína específica de transporte en plasma que es la **transferrina**; el funcional: Fe formando parte de proteínas que lo utilizan de cofactor metálico, el 65% es la hemoglobina y el resto son enzimas con grupos hemo: el tercer y último es el Fe de reserva almacenado en el hígado, bazo y médula ósea.*

## 2.6 Función del bazo

*El bazo está formado por una cápsula de tejido conectivo con trabéculas en su interior, entre dichas trabéculas se sitúa la pulpa roja y la pulpa blanca. La primera es la que desarrolla las funciones respecto a los eritrocitos:*

- *Maduración de los reticulocitos.*
- *Destrucción y eliminación de los eritrocitos envejecidos o deteriorados.*

## 2.7 Determinaciones de interés clínico

- *HCM (HGM): **hemoglobina corpuscular (o globular) media**: es la cantidad promedio de hemoglobina que tiene cada eritrocito: 30 pg.*

$$HGM = \frac{[\text{Hemoglobina}]}{\text{recuento celular}}$$

CHCM (CHGM): concentración de hemoglobina corpuscular (o globular) media, es la concentración media dentro de cada eritrocito, normalmente se expresa en gr/100 ml de volumen celular. 34% (34 gr/100 ml).

$$CHGM = \frac{[\text{Hemoglobina}]}{\text{volumen celular}}$$

VCM (VGM): volumen corpuscular (o globular) medio, es el volumen promedio de un eritrocito.

$$VCM = \frac{\text{volumen celular}}{\text{recuento celular}}$$

## Tema 3. Grupos sanguíneos

### 3.1 Principios fisiológicos

*La pérdida de cantidades grandes de sangre conduce, en poco tiempo, a la muerte. Por ello no es de extrañar que, ya desde antiguo, se haya intentado reemplazar la sangre perdida por medio de inyecciones de sangre procedente de otras personas e incluso de animales. Sin embargo, la transfusión indiscriminada de sangre ocasionaba, a veces, efectos fatales para el enfermo que la recibía. Así cuando fueron intentadas las primeras transfusiones de sangre, se producía a menudo la aglutinación inmediata o retrasada y la hemólisis de los glóbulos rojos, causando reacciones de transfusión que, con frecuencia, conducían a la muerte. Pronto se descubrió que las sangres de personas diferentes tienen diferentes antígenos, de modo que los anticuerpos en el plasma de una sangre reaccionan con antígenos sobre las superficies de las células rojas. Se han encontrado al menos unos 30 antígenos comunes y cientos de otros, menos frecuentes, en las membranas de las células sanguíneas. La mayor parte son débiles, y no dan lugar a reacciones de transfusión, utilizándose para determinar relaciones de parentesco.*

*La incompatibilidad sanguínea, es un ejemplo de reacción inmunitaria, y da lugar a una serie de reacciones, que son el resultado de la interacción de antígenos de la membrana de los hematíes con macromoléculas presentes en el plasma del sujeto receptor.*

*En una reacción de **aglutinación** ("agrupamiento") y posterior **hemólisis** ("rotura"), interviene un aglutinógeno presente en los eritrocitos del donante y una aglutinina específica presente en el plasma del receptor. Evidentemente, ninguna de estas combinaciones se da de forma natural puesto que se produciría una reacción de autoaglutinación.*

*La aglutinación suele ser visible en pocos minutos. Las células aglutinadas tienen un aspecto de granos en un líquido claro. Si no hay aglutinación el líquido sigue teniendo un aspecto rosado uniforme.*

*Si se administra a un paciente la sangre equivocada, la aglutinación de los eritrocitos puede bloquear los pequeños vasos sanguíneos en órganos vitales,*

como los pulmones o el cerebro. La consiguiente hemólisis de los glóbulos aglutinados puede dar lugar a la aparición de hemoglobina en la orina y finalmente a una insuficiencia renal y a la muerte.

### 3.1.1 Sistema ABO

LANDSTEINER descubrió la existencia de dos factores hereditarios en los hematíes: los **aglutinógenos** o **antígenos A** y **B**, y en el plasma **aglutininas** o **anticuerpos** específicos para antígenos del mismo sistema. Los eritrocitos de algunos individuos poseen el antígeno A, otros individuos tienen en sus eritrocitos el antígeno B, un tercer grupo de personas posee ambos antígenos y, finalmente, hay un cuarto grupo cuyos hematíes no tienen en su membrana ninguno de estos antígenos. Existen, por lo tanto, **cuatro tipos sanguíneos** de este sistema que denominamos **sistema A B O**, estos son: **A, B, AB** y **O (cero)**, los cuales están determinados genéticamente. Dado que este sistema de antígenos no está, exclusivamente, distribuido en las membranas de los hematíes, sino que, bien al contrario, este tipo de antígenos se encuentra en multitud de secreciones y/o células, los contactos interespecíficos permiten que se desarrolle actividad inmunitaria **contra los antígenos que no se poseen**. Ello permite que se produzca la situación siguiente:

- La sangre del grupo A contiene el antígeno A en sus hematíes y el anticuerpo anti-B en el plasma.
- La sangre del grupo B tiene el aglutinógeno B en sus hematíes y la aglutinina anti-A en su plasma.
- La sangre del grupo O no tiene antígenos en sus hematíes y, en consecuencia, tiene aglutininas anti-A y anti-B.
- La sangre del grupo AB tiene hematíes con los dos tipos de antígenos A y B, pero su plasma no contiene aglutininas.

Genotipo	Grupo sanguíneo	Aglutinógenos	Aglutininas
OO	O	-	Anti-A y Anti-B
OA o AA	A	A	Anti-B
OB o BB	B	B	Anti-A
AB	AB	A y B	-

Frecuencia relativa de los diferentes grupos del sistema ABO.

Grupo	Frecuencia
O	47%
A	41%
B	9%
AB	3%

### 3.1.2 Sistema Rh

Además de los antígenos del sistema AB0, existen otros innumerables aglutinógenos en los eritrocitos. Los del **sistema Rh** tienen importancia clínica. En este sistema los individuos se clasifican como **Rh positivos** o **Rh negativos**, perteneciendo el 85% de la población española al primer tipo. A diferencia del sistema de grupos anterior su distribución en las células y secreciones orgánicas está menos extendida, lo que significa que para que en el plasma de una persona **Rh negativa** existan **anticuerpos Rh** se hace necesario un primer contacto, que active el sistema inmunitario.

En realidad el sistema Rh está determinado genéticamente por tres pares de alelos (C, c, D, d, E y e), los cuales determinan la expresión en la membrana de los hematíes de los antígenos correspondientes (C, D y E). El más importante es, con mucho, el aglutinógeno D.

Cuando se inyectan glóbulos rojos que contienen el factor Rh, en una persona Rh negativa, las aglutininas anti-Rh se desarrollan lentamente alcanzando su máxima concentración de 2 a 4 meses después.

La respuesta inmune es mucho más potente en unas personas que en otras. Si se producen más exposiciones al antígeno la persona puede quedar sensibilizada al factor Rh. En una transfusión de células Rh positivo a un individuo Rh negativo puede no observarse una reacción inmediata, sin embargo, al cabo de unas 2-4 semanas se ha sintetizado suficiente cantidad de aglutininas para eliminar la totalidad de las células Rh positivas que se encontraban circulantes. Se produce, por tanto, una reacción retardada, aunque habitualmente débil. En subsiguientes transfusiones, cuando la persona está inmunizada, la reacción puede ser inmediata y potente, del mismo tipo que las provocadas por el sistema AB0.

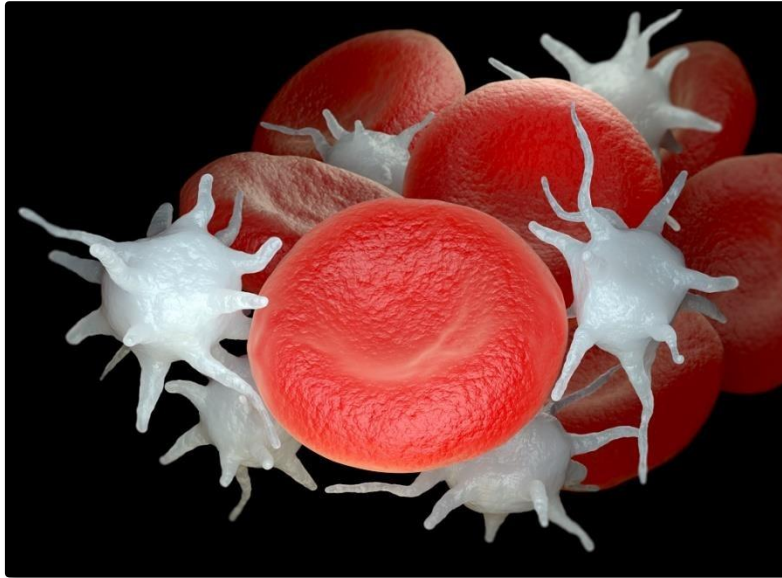
## Tema 4. Hemostasia: plaquetas

Se define hemostasia como todos aquellos procesos destinados a evitar o disminuir las pérdidas de sangre por lesiones en las paredes vasculares.

### 4.1 Plaquetas

Las plaquetas o trombocitos se encuentran en número de 150.000 a 400.000 por mm<sup>3</sup> de sangre. Las plaquetas son los elementos formes más pequeños de la

sangre. Tienen un diámetro de unas  $2\mu$ . Son corpúsculos anucleados con multitud de gránulos citoplasmáticos que son segregados durante su activación. Se forman en la médula ósea, mediante un proceso denominado trombopoyesis. En condiciones normales se forman  $40.000\text{ mm}^3/\text{día}$ .



Fuente: [50https://hematologa.com/wp-content/uploads/2021/02/red-blood-cells-and-activated-platelets-or-thrombo-HP4TCSZ.jpg](https://hematologa.com/wp-content/uploads/2021/02/red-blood-cells-and-activated-platelets-or-thrombo-HP4TCSZ.jpg)

En su citoplasma se encuentran gránulos de dos tipos:

1. **Gránulos  $\alpha$**  que contienen proteínas como el factor plaquetario 4 (o factor de crecimiento de los fibroblastos), factores de la coagulación como factor V y VIII, y otras proteínas como la fibronectina, trombospondina,  $\alpha_1$ -antitripsina o  $\alpha_2$ -macroglobulina.
2. El segundo tipo de gránulos se denomina **cuerpos densos** y contienen serotonina,  $\text{Ca}^{++}$ , ADP, ATP, tromboxano  $\text{A}_2$ , y otras sustancias que participan en la hemostasia.

Las funciones plaquetarias son:

- Mantenimiento de la integridad vascular.
- Interrupción inicial de la hemorragia, mediante la formación del tapón plaquetario, clavo plaquetario o trombo blanco.
- Estabilización del tapón mediante los factores necesarios para la formación de fibrina.
- Retracción del trombo.
- Restauración del endotelio vascular mediante la producción de factores de crecimiento.

### **4.1.1 Trombopoyesis**

*De la célula precursora se diferencian los megacarioblastos, después los megacariocitos y al fragmentarse dan lugar a las plaquetas.*

## **4.2 Hemostasia**

### **4.2.1 Hemostasia primaria**

*Es el conjunto de fenómenos que lleva a la formación del tapón plaquetario, primer paso en la detención de la hemorragia, impidiendo la salida de elementos formes de la sangre. Durante esta fase intervienen dos mecanismos: uno vascular y otro plaquetario.*

- a) *Espasmo vascular. De manera inmediata a la producción de la rotura del vaso, se produce una potente contracción de las fibras musculares del mismo. El resultado es una vasoconstricción que disminuye el calibre del vaso, e incluso si es pequeño puede llegar a cerrarse, disminuyendo la pérdida de sangre.*
- b) *Formación del tapón plaquetario. En la formación del tapón plaquetario pueden distinguirse las siguientes etapas:*
  1. *Adhesión o adherencia plaquetaria.*
  2. *Secreción y agregación plaquetaria.*

#### **4.2.1.1 Adhesión o adherencia plaquetaria**

*Tras la ruptura del endotelio vascular las plaquetas se adhieren a las estructuras subendoteliales, principalmente a las fibras de colágeno que afloran por la superficie rota y entran en contacto con las plaquetas. En este proceso las plaquetas pierden su forma discoide, haciéndose esféricas y emitiendo espículas por medio de las cuales se adhieren al tejido circundante. En el proceso de adhesión se precisan varias glucoproteínas de la membrana plaquetaria, el factor de von Willebrand plasmático y el colágeno y la membrana basal subendoteliales. Este proceso dura muy poco, unos 2-3 segundos.*

#### **4.2.1.2 Secreción y agregación plaquetaria**

*Se llama agregación al proceso por el cual las plaquetas se fijan unas a otras. Este proceso requiere  $Ca^{++}$  y ADP que deben liberarse de los gránulos plaquetarios mediante un proceso denominado activación o secreción plaquetaria.*

*Las plaquetas sufren una profunda transformación estructural. Las membranas de los gránulos densos se unen con la membrana plasmática liberando su*

contenido al exterior y los gránulos a liberan su contenido. Las sustancias liberadas tienen muy diferentes tipos de actividad biológica:

- Estimulan los cambios estructurales de las propias plaquetas.
- Aumentan la adherencia plaquetaria y la secreción de más gránulos plaquetarios.
- Aumentan el reclutamiento y activación de más plaquetas.
- Favorecen la agregación y la coagulación.

Esta secreción produce más modificaciones en las plaquetas adheridas y atrae a otras plaquetas, para irse agregando paulatinamente. Las plaquetas se mantienen unidas entre sí por puentes de enlace entre sus membranas y el tejido subendotelial. De esta forma se ha establecido una barrera, aún permeable por los espacios que quedan libres entre las plaquetas, pero que forma una línea de defensa inicial, el tapón plaquetario, o trombo blanco, para la posterior actuación del proceso de la coagulación.

#### **4.2.2 Hemostasia secundaria o coagulación**

Es un proceso que modifica el estado líquido de la sangre dándola una estructura de tipo gel. Consiste en la transformación de una proteína soluble, el fibrinógeno, en una proteína insoluble: la fibrina; formando una malla o red que encierra elementos formes (coágulo), fortaleciendo así la unión entre plaquetas con el objeto de impedir de forma definitiva la hemorragia.

De forma esquemática se puede representar como una cascada enzimática realizada por y sobre proteínas plasmáticas.

Tiene varias fases:

1. Formación de protrombinasa o activador de protrombina.
2. Formación de trombina.
3. Formación de fibrina.

##### **4.2.2.1 Formación de protrombinasa**

Puede seguir dos vías:

- Vía extrínseca, extravascular o exógena (ver esquemas de la presentación en material complementario).
- Vía intrínseca, intravascular o endógena (ver esquemas de la presentación en material complementario).

Las dos vías coinciden activando el factor X para a partir de este punto formar la vía final común. Este factor junto con el factor plaquetario 3, el calcio y el

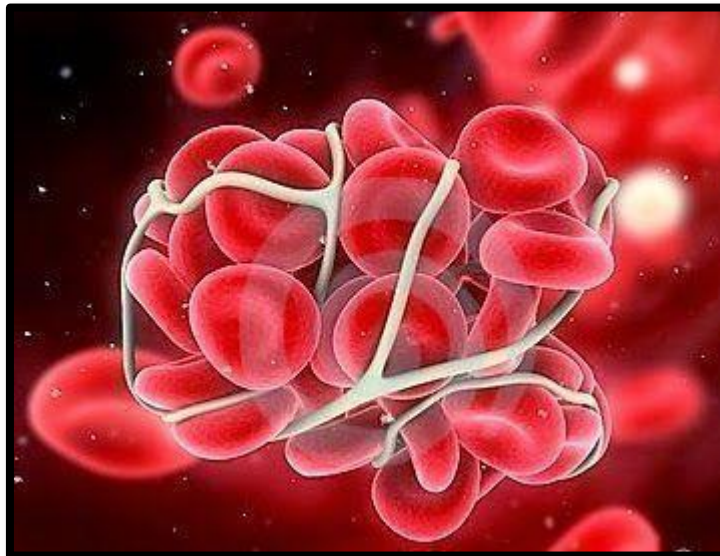
factor V forma un complejo enzimático denominado protrombinasa o activador de la protrombina.

#### **4.2.2.2 Formación de trombina**

Se realiza en una única reacción sobre la protrombina (Factor II).

#### **4.2.2.3 En la sangre se encuentra presente una proteína inactiva, el Factor I o fibrinógeno.**

La trombina cataliza el fraccionamiento de esta molécula formando monómeros de fibrina, solubles e inestables que en presencia de  $Ca^{++}$  y Factor XIII activado se polimerizan; formando un polímero insoluble en forma de red o malla tridimensional que cierra los espacios entre las plaquetas y sella de forma definitiva el tapón plaquetario, dando lugar al trombo rojo o coágulo.



Fuente: [51https://www.fisiologiadelejercicio.com/wp-content/uploads/2017/05/coagulaci%C3%B3n-sangu%C3%ADnea.jpg](https://www.fisiologiadelejercicio.com/wp-content/uploads/2017/05/coagulaci%C3%B3n-sangu%C3%ADnea.jpg)

#### **4.2.3 Fibrinólisis o resolución tras la coagulación**

Esta última fase tiene lugar una vez que la pared vascular se ha reconstituido de nuevo, y ya no se requiere la presencia del coágulo. Este proceso se denomina fibrinólisis y consiste en la eliminación de la fibrina. Su importancia es mayor bajo el punto de vista de control en la prevención de la formación de coágulos, que en la eliminación de los mismos. El equilibrio entre la formación de fibrina y su eliminación contribuye a la limitación del proceso hemostático a la región circundante al punto de lesión.

La reacción fundamental es la conversión de una proteína plasmática inactiva el plasminógeno en una activa la plasmina. Esta activación es realizada por

*factores endógenos como el factor activador del plasminógeno presente en las células endoteliales o la eritrocina presente en células sanguíneas.*

#### **4.2.4 Sistemas anticoagulantes**

*La prevención de la coagulación sanguínea en el sistema vascular es un capítulo importante, ya que tan relevante es la formación de un coágulo como su limitación a un tamaño adecuado evitando que se produzca una coagulación indiscriminada.*

*La superficie endotelial es uno de los mejores factores de seguridad ya que el mantenimiento de su integridad es una garantía para impedir la activación de la hemostasia. Las proteínas de membrana de la célula endotelial repelen los factores de coagulación. Una de estas proteínas es la trombomodulina que actúa como un receptor para la trombina uniéndose a ella y dando lugar a la activación de unas proteínas plasmáticas (C y S) que inactivan factores de coagulación y bloquean la formación de trombina.*

*Los propios hilos de fibrina absorben entre el 85% y el 90% de la trombina formada, limitando su difusión y su acción proteolítica. Otros inhibidores de la trombina son la antitrombina III que se une a ella inactivándola; y la  $\alpha$ 2-macroglobulina y la  $\alpha$ 1-antitripsina. La heparina es un glucosaminoglucano secretado por los mastocitos y leucocitos basófilos que es administrado cuando se requiere una acción anticoagulante rápido. Su mecanismo de acción es unirse a la antitrombina III y potenciar su acción. Otros anticoagulantes funcionan secuestrando el calcio e impidiendo de esta forma la coagulación, como el citrato sódico, oxalato sódico o EDTA sódico. O los denominados anticoagulantes indirectos (cumarinas) que bloquean la absorción de la vitamina K impidiendo la síntesis proteica en el hígado de los factores de coagulación II, VII, IX y X.*

### **Referencias**

*Anatomía y fisiología del sistema circulatorio:*

Tortora, G. J., & Derrickson, B. (2017). Principios de anatomía y fisiología (15a ed.). Wiley.

Marieb, E. N., & Hoehn, K. (2018). Anatomía y fisiología humana (11a ed.). Pearson.

*Estructura y función del corazón:*

Guyton, A. C., & Hall, J. E. (2015). Tratado de fisiología médica (13a ed.). Elsevier.

Silverthorn, D. U. (2018). Fisiología humana: un enfoque integrado (8a ed.). Pearson.

*Vasos sanguíneos y circulación:*

Hall, J. E. (2015). Guyton y Hall. Tratado de fisiología médica (13a ed.). Elsevier.

Tortora, G. J., & Derrickson, B. (2017). Principios de anatomía y fisiología (15a ed.). Wiley.

*Regulación de la presión arterial y el flujo sanguíneo:*

Hall, J. E. (2015). Guyton y Hall. Tratado de fisiología médica (13a ed.). Elsevier.

Silverthorn, D. U. (2018). Fisiología humana: un enfoque integrado (8a ed.). Pearson.

*Transporte de gases y nutrientes:*

Tortora, G. J., & Derrickson, B. (2017). Principios de anatomía y fisiología (15a ed.). Wiley.

Marieb, E. N., & Hoehn, K. (2018). Anatomía y fisiología humana (11a ed.). Pearson.

*Enfermedades y trastornos del sistema circulatorio:*

Robbins, S. L., Cotran, R. S., & Kumar, V. (2015). Robbins y Cotran. Patología estructural y funcional (9a ed.). Elsevier.

Tortora, G. J., & Derrickson, B. (2017). Principios de anatomía y fisiología (15a ed.). Wiley.