

## UNIDAD IX

**SISTEMA CIRCULATORIO.** Plan general. Circulación abierta y cerrada. Actividad eléctrica del corazón. Propiedades mecánicas del corazón. Hemodinámica: presión, flujo, resistencia. Sistema arterial. Sistema venoso. Capilares. Sistema linfático. Variaciones del corazón y la circulación en peces, anfibios, reptiles y mamíferos. Sangre. Funciones. Composición. Hemoglobina. Inmunidad. Hemostasia.



<https://www.saludycuidado.net/>

## 1. GENERALIDADES

En pequeños animales, menores de 1 mm, los sustratos metabólicos y los productos de desecho se suministran y excretan por difusión a través del cuerpo. En animales más grandes y más complejos se ha logrado el desarrollo de un sistema que distribuye por todo el cuerpo los elementos necesarios, que incluyen: gases respiratorios, nutrientes, hormonas, anticuerpos, sales y productos de desecho.

Este Sistema Circulatorio contiene muchos tipos especiales de células, actúa como vehículo homeostático y juega algún papel en prácticamente todas las funciones fisiológicas. En general vamos a encontrar:

1. Un órgano impulsor principal, normalmente es el corazón, que obliga a la sangre a fluir por todo el organismo;
2. Un sistema arterial, que puede actuar como distribuidor de la sangre y como reservorio de presión;
3. Un sistema de capilares en los que se efectúa la transferencia de materiales entre la sangre y los tejidos;
4. Un sistema venoso que actúa como reservorio de sangre y como sistema de retorno de la sangre al corazón.

El movimiento de la sangre a través del organismo es el resultado de las fuerzas ejercidas por las contracciones rítmicas del corazón, por la compresión de los vasos sanguíneos durante los movimientos corporales o por las contracciones peristálticas de los músculos lisos que rodean a los vasos sanguíneos. La importancia relativa de cada uno de estos mecanismos en la generación del flujo es variable. En todos los animales, algunas válvulas o tabiques determinan la dirección del flujo.

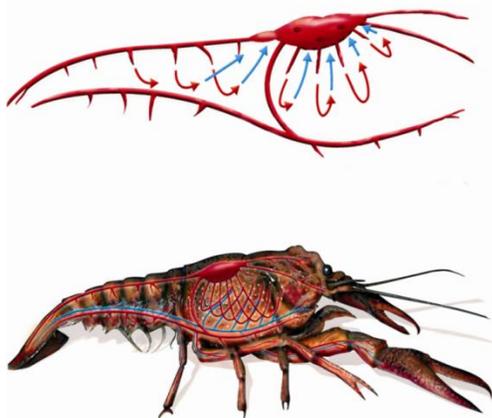
## 2. CLASIFICACIONES DEL SISTEMA CIRCULATORIO

### 2.1 SEGÚN LA CONTINUIDAD DEL SISTEMA

#### 2.1.1 Sistema Circulatorio Abierto

Los aparatos circulatorios abiertos son característicos de la mayoría de los invertebrados, como artrópodos y moluscos no cefalópodos. Consiste un tipo de sistema en el cual la sangre no está siempre contenida en una red de vasos sanguíneos. Es decir que la sangre bombeada por el corazón se vacía, a través de un sistema arterial, en una cavidad abierta denominada *Hemocele*, que se encuentra entre el ectodermo y el endodermo, donde se produce el intercambio de los nutrientes y los gases. La hemolinfa entra en el corazón por

succión a través de una serie de ostiolas, estos orificios poseen válvulas que impiden su retorno. El líquido contenido por el hemocele se denomina *Hemolinfa* o sangre, no circula a través de los capilares sino que baña directamente los tejidos. En algunos animales puede llegar a constituir entre el 20 y 40% del volumen corporal.



**Fig. 1: Sistema Circulatorio Abierto en invertebrado**

Los sistemas circulatorios abiertos tienen presiones bajas que rara vez superan el intervalo comprendido entre 0,6 y 1,3 kPa (4,5 – 9,75 mmHg). Excepcionalmente se han registrado presiones más altas en algunas regiones del cuerpo de estos animales, por ej. en el caracol de tierra *Helix*, debido a las presiones originadas por la contracción del corazón. En moluscos bivalvos también se han detectado presiones altas en el

pie muscular. El significado funcional de estas presiones en una circulación abierta es que parece contribuir al mantenimiento de la postura del animal.

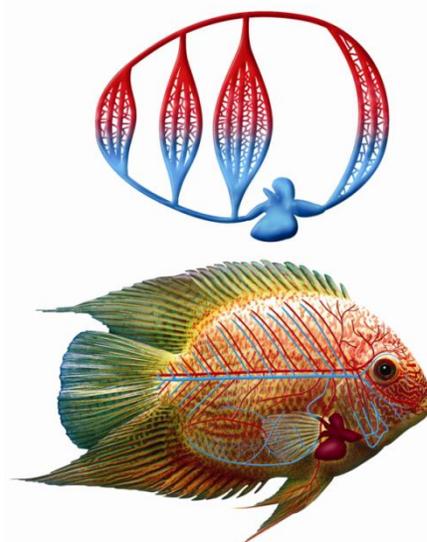
Los animales con circulación abierta tienen por lo general una capacidad limitada para alterar la velocidad y la distribución del flujo sanguíneo, por lo tanto los cambios en la captación de  $O_2$  por unidad de peso, son bajas. Las distancias a cubrir deben ser pequeñas ya que sería imposible cubrir tasas de consumo de  $O_2$  elevadas si la distancia de difusión del  $O_2$  entre la Hemolinfa y los tejidos fuera muy grande. Una solución a este problema se ha dado en los insectos que han desarrollado su sistema traqueal, en el que se produce el transporte directo de los gases a los tejidos a través de tubos llenos de aire y no de la sangre. En consecuencia poseen una mayor capacidad para el metabolismo aeróbico.

### 2.1.2 Sistema Circulatorio Cerrado

Algunos invertebrados como los Cefalópodos (pulpo y calamar) son una excepción, debido a que presentan circulación cerrada, su sangre fluye en el interior de un circuito continuo de tubos, desde las arterias hasta las venas a través de los capilares. Pueden nadar rápidamente y mantener tasas de captación de  $O_2$  elevadas y ello es posible solo si se produce un flujo aumentado y una distribución eficiente de sangre hacia el músculo activo. El corazón es el principal órgano impulsor que bombea sangre al interior del sistema arterial y mantiene elevada la presión sanguínea en las arterias. El sistema arterial actúa a su vez como un reservorio de presión obligando el paso de la sangre a través de los capilares, que son los que realizan la transferencia de materiales entre la sangre y los

tejidos. Además la sangre está sometida a una presión suficiente como para permitir su ultrafiltrado en los riñones.

El sistema venoso recoge sangre de los capilares y la conduce de regreso al corazón. Las venas son estructuras que resisten baja presión, en las que grandes cambios de volumen tienen poco efecto sobre la presión venosa. Por lo tanto el sistema venoso tiene la mayor parte de la sangre y actúa como un reservorio de gran volumen. En conjunto con el sistema cerrado de circulación se ha desarrollado un sistema linfático (en animales vertebrados) para recuperar el líquido perdido desde la sangre hacia los tejidos.



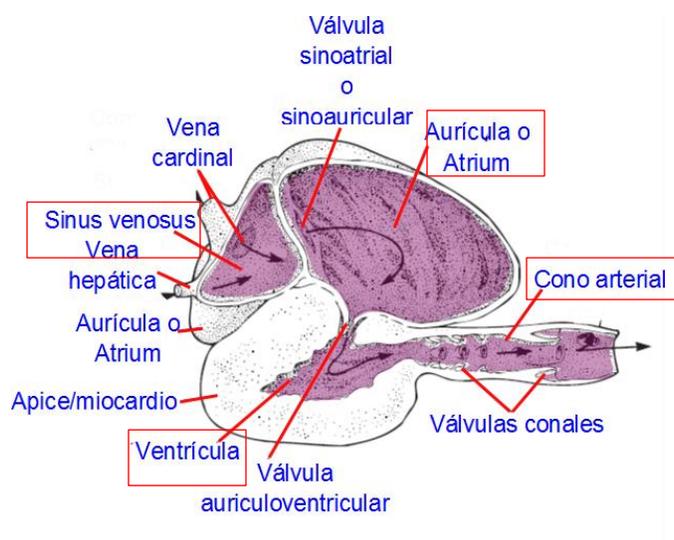
**Fig. 2: Sistema Circulatorio Cerrado y Simple en Pez**

## 2.2 SEGÚN LA CANTIDAD DE VECES QUE PASA LA SANGRE POR EL CORAZÓN

### 2.2.1 Sistema Circulatorio Simple

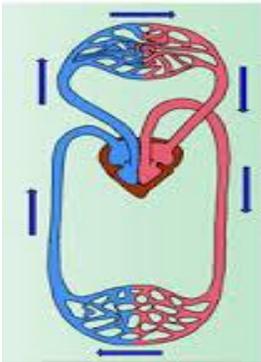
Dentro de un sistema circulatorio cerrado, se define la circulación simple como aquella que realiza un único paso de la sangre por el corazón durante el recorrido total del circuito. Tal es el caso de los peces (Fig. 2).

Los peces tienen un sistema circulatorio cerrado con un corazón que bombea la sangre a través de un circuito único por todo el cuerpo. La sangre desoxigenada va del corazón a las branquias, de éstas sale oxigenada al resto del cuerpo, para finalmente regresar al corazón. En la mayoría de los peces el corazón consta de cuatro cavidades: el *Seno Venoso*, es una cámara de paredes delgadas que recibe la sangre de las venas; una *Aurícula*, un *Ventrículo* y el *Bulbo o Cono Arterioso* que se une con un gran vaso sanguíneo llamado aorta, por la cual la sangre fluye hacia las branquias del pez.



**Fig. 3: Corazón de pez**

## 2.2.2 Sistema Circulatorio Doble



En los animales que tienen este tipo de Sistema Circulatorio la sangre pasa dos veces por el corazón en cada circuito. Esta circulación coincide con los animales que tienen pulmones para respirar y en ellos distinguen dos tramos de circulación, uno que va del corazón a los pulmones y otro que va del corazón al resto del cuerpo. Tal como ocurre en anfibios, reptiles, aves y mamíferos.

Fig. 4: Sistema Circulatorio Cerrado y doble

## 2.3 SEGÚN LA SEPARACIÓN DE CAVIDADES DEL CORAZÓN

### 2.3.1 Sistema Circulatorio Completo

En este sistema la sangre oxigenada nunca llega a mezclarse con la sangre desoxigenada debido a que el corazón tiene cavidades bien definidas que separan la sangre que lo recorre cuando hay doble circuito. Es propio de aves y mamíferos.

### 2.3.2 Sistema Circulatorio Incompleto

Se habla de circulación incompleta cuando en algún punto del circuito se mezcla la sangre oxigenada con la desoxigenada. Es propia de animales como los anfibios y los reptiles que se caracterizan por tener un corazón que no está perfectamente tabicado, en el caso de los anfibios, poseen dos aurículas y un ventrículo; los reptiles no cocodrilianos tienen dos aurículas y dos ventrículos, pero este último está incompletamente tabicado.

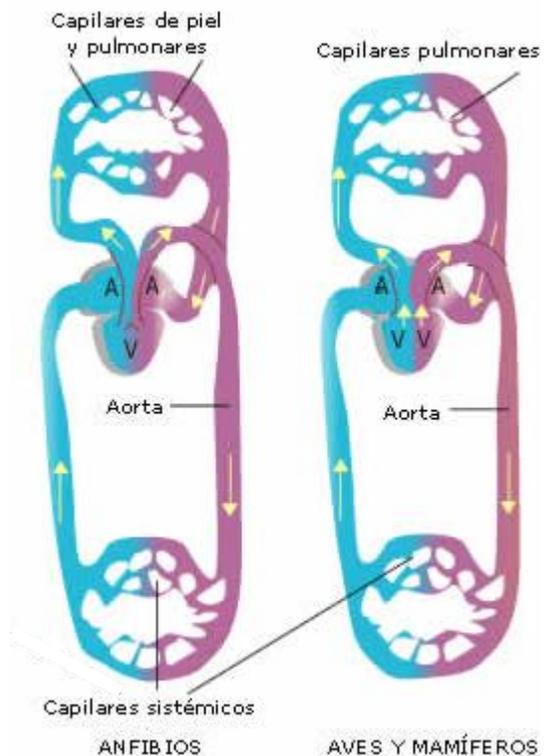


Fig. 5: Sistema circulatorio incompleto (anfibios) y Completo (aves y mamíferos)

## 3. CORAZÓN

Los corazones son bombas musculares formadas por fibras musculares cardíacas, semejantes en muchos aspectos a las fibras estriadas de los vertebrados en cuanto a estructura y función de contracción. Un latido cardíaco consiste en una contracción y relajación rítmica de la totalidad de la masa muscular. La contracción de cada célula está asociada a un *Potencial de Acción* en dicha célula. La actividad eléctrica se inicia en una

región marcapaso del corazón y se propaga a todo el órgano de una célula a otra, debido a que están eléctricamente acopladas a través de las uniones de membrana.

Las células marcapasos son capaces de mantener una actividad espontánea y pueden ser neuronas o células musculares. Si el latido se inicia en una neurona se habla de un marcapasos *Neurogénico*; como en el caso de los crustáceos decápodos. Sobre el corazón se ubica el ganglio cardíaco que actúa como marcapasos controlado por el Sistema Nervioso Central. Si el latido se inicia en una célula muscular se habla de marcapasos *Miogénico*, como es el caso de los moluscos y todos los vertebrados. En ellos el marcapasos se ubica en el Seno Venoso o en un vestigio del mismo, es llamado *Nódulo Senoauricular* y consiste en unas pequeñas células musculares especializadas, débilmente contráctiles.

El corazón puede contener muchas células capaces de presentar una actividad marcapasos, pero debido a que todas las células cardíacas están acopladas eléctricamente, la célula con la velocidad intrínseca más rápida es la única que estimula al corazón completo para su contracción y determina la frecuencia cardíaca. Esta célula marcapasos dominará normalmente a las que tengan una actividad marcapasos más lenta, pero si el marcapasos normal se parase, las otras células marcapasos determinarán una nueva frecuencia cardíaca más lenta. En el caso de que un marcapasos latente pase a estar desacoplado eléctricamente del marcapasos principal, podrá latir y controlar una porción del músculo cardíaco, incluso una cavidad completa, a una velocidad diferente. Este marcapasos ectópico es peligroso pues desincronizará la acción de bombeo de las cámaras del corazón.

En los mamíferos es un órgano musculoso y cónico situado en la cavidad torácica, está dividido en cuatro cámaras: dos superiores, llamadas *Aurículas*: derecha e izquierda y dos cavidades inferiores llamadas *Ventrículos*: derecho e izquierdo.

El lado derecho del corazón recibe sangre desoxigenada en la aurícula derecha, desde: la *Vena Cava Inferior* (VCI), que transporta la sangre procedente del tórax, el abdomen y las extremidades inferiores y la *Vena Cava Superior* (VCS), que recibe la sangre de las extremidades superiores y la cabeza.

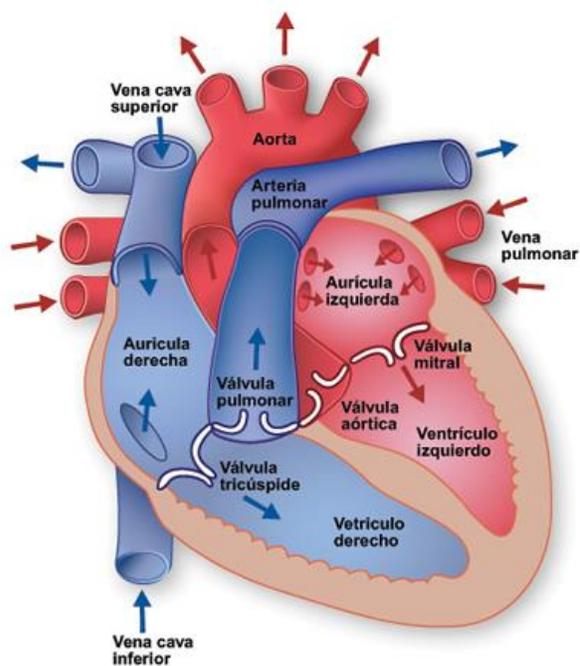


Fig. 6: Corazón, cámaras y vasos

La sangre traspasa al ventrículo derecho a través de la *Válvula Tricúspide* y desde aquí se impulsa hacia los pulmones a través de las *Arterias Pulmonares*, separadas del ventrículo derecho por una *Válvula Arterial*.

La sangre vuelve al lado izquierdo del corazón a través de las *Venas Pulmonares*, entrando en la aurícula izquierda. De aquí pasa al ventrículo izquierdo por la *Válvula Mitral o Bicúspide*. Desde el ventrículo izquierdo, la sangre es propulsada hacia la *Arteria Aorta* a través de la válvula arterial, para proporcionar oxígeno a todos los tejidos del organismo.

### 3.1 TRASMISION DE LA EXITACION

La actividad iniciada en la región marcapasos del corazón se conduce a todo el órgano pues la despolarización de una célula provoca la de otras vecinas en virtud de la corriente que fluye a través de las uniones hendidas. Las áreas de contacto se incrementan por repliegues e interdigitaciones de la membrana. La uniones hendidas suponen regiones de baja resistencia entre células y permiten el flujo de corriente de una célula a la siguiente a través de los discos intercalares.

Normalmente la dirección de transmisión es única puesto que se propaga desde la región del marcapasos hacia el resto del órgano. Hay varias vías de excitación de una sola fibra muscular cardíaca debido a que las conexiones intercelulares son numerosas. Si una porción del corazón pierde funcionalidad la onda puede rodear fácilmente esa porción de modo que el resto del corazón puede seguir siendo excitado. La naturaleza del PA cardíaco asegura que las múltiples conexiones no provoquen una estimulación también múltiple y la reverberación de la actividad en el músculo cardíaco.

En el corazón de los mamíferos la onda de excitación se propaga desde el *Nódulo Sinoauricular (SA)* hacia ambas aurículas en forma concéntrica a una velocidad de  $0,8 \text{ m}\cdot\text{seg}^{-1}$ . Las aurículas están conectadas a los ventrículos tan solo a través del *Nódulo Auriculoventricular (NA)*. La excitación se trasmite al ventrículo a través de pequeñas fibras de conexión en las que la velocidad de la onda disminuye hasta aproximadamente  $0,05 \text{ m}\cdot\text{seg}^{-1}$ . Las fibras de conexión están acopladas a fibras nodales, las cuales a su vez se hallan comunicadas a través de unas fibras de transmisión al Fascículo de Hiss. Este fascículo está constituido por los haces derecho e izquierdo y cubre el endocardio de ambos ventrículos

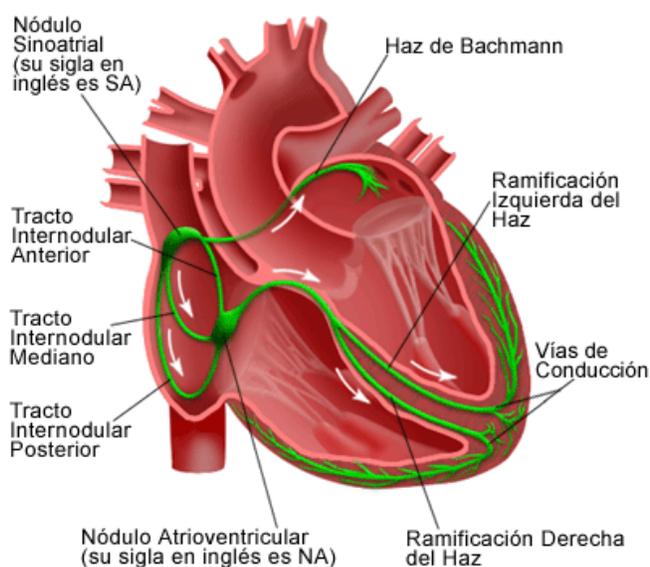
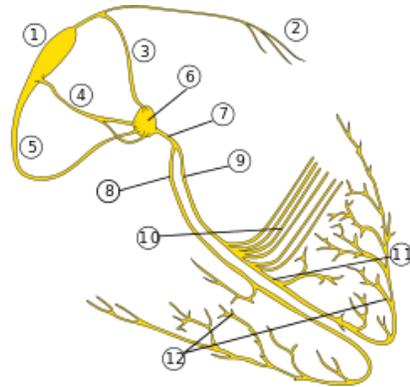


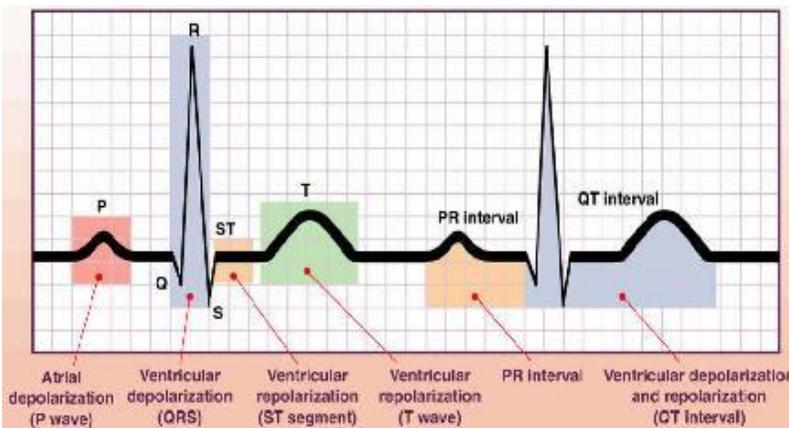
Fig. 7: Corazón, marcapasos y fibras de conexión

transmitiendo la excitación y provocando la contracción sincrónica de las fibras musculares. La onda de excitación es seguida casi inmediatamente por las contracciones de las fibras ventriculares epicardiales.

Fibras cardiacas	Velocidad
1- Nódulo Senoauricular	0,8 m.s <sup>-1</sup>
3,4,5- Fibras de conexión	0,05 m.s <sup>-1</sup>
6- Fibras nodales	0,1 m.s <sup>-1</sup>
7,8,9- Fascículo de Hiss	4-5 m.s <sup>-1</sup>
10,11,12- Fibras ventriculares	0,5 m.s <sup>-1</sup>



El significado funcional de la organización eléctrica de las células es su capacidad para generar contracciones sincrónicas y separadas de las aurículas y los ventrículos. Así la conducción lenta a través del SA permite que la contracción de las aurículas preceda a la de los ventrículos y proporciona un desfase de tiempo que permite el paso de sangre desde las aurículas a los ventrículos. La corriente que fluye durante la actividad sincrónica de las células cardiacas puede detectarse como pequeños cambios de potencial en distintos puntos de todo el cuerpo. Estos cambios de potencial se registran en el



Electrocardiograma. La onda P está asociada a la despolarización de la aurícula, el complejo QRS a la despolarización del ventrículo y la onda T, a la repolarización del mismo.

**Fig. 8: Electrocardiograma**

### 3.2 PROPIEDADES MECANICAS DEL CORAZON

El corazón consiste en varias cámaras musculares conectadas en serie y equipadas con válvulas que permiten el flujo sanguíneo en una sola dirección. Las contracciones del corazón provocan la expulsión de sangre al sistema arterial. La serie de cámaras permite el incremento escalonado de presión según la sangre pasa de la rama venosa a la arterial.

### 3.2.1 CICLO CARDIACO

Durante la *Diástole* (relajación del corazón) las válvulas aorticas mantienen grandes diferencias de Presión entre los ventrículos relajados y las arterias Aorta y Pulmonar. Las válvulas auriculoventriculares están abiertas y la sangre fluye a los ventrículos.

Cuando se contraen las aurículas: *Sístole Auricular*, aumenta la presión en ellas y la sangre pasa a los ventrículos, iniciando éstos su contracción. La presión aumenta en los ventrículos y supera la de las aurículas. Se cierran entonces las válvulas auriculoventriculares evitando el reflujo a las aurículas. La *Sístole Ventricular* continúa. Tanto las válvulas auriculoventriculares como las aorticas están cerradas, de modo que los ventrículos forman una cámara cerrada en la que no hay cambios de volumen; es decir que la contracción ventricular es isométrica. La presión ventricular interna aumenta rápidamente y supera a la presión aortica, abriendo las válvulas arteriales y expulsando la sangre. La presión intraventricular disminuye por relajación del músculo, las válvulas auriculoventriculares se abren cuando la presión ventricular disminuye por debajo de la presión auricular y una vez más se comienza a llenar el ventrículo.

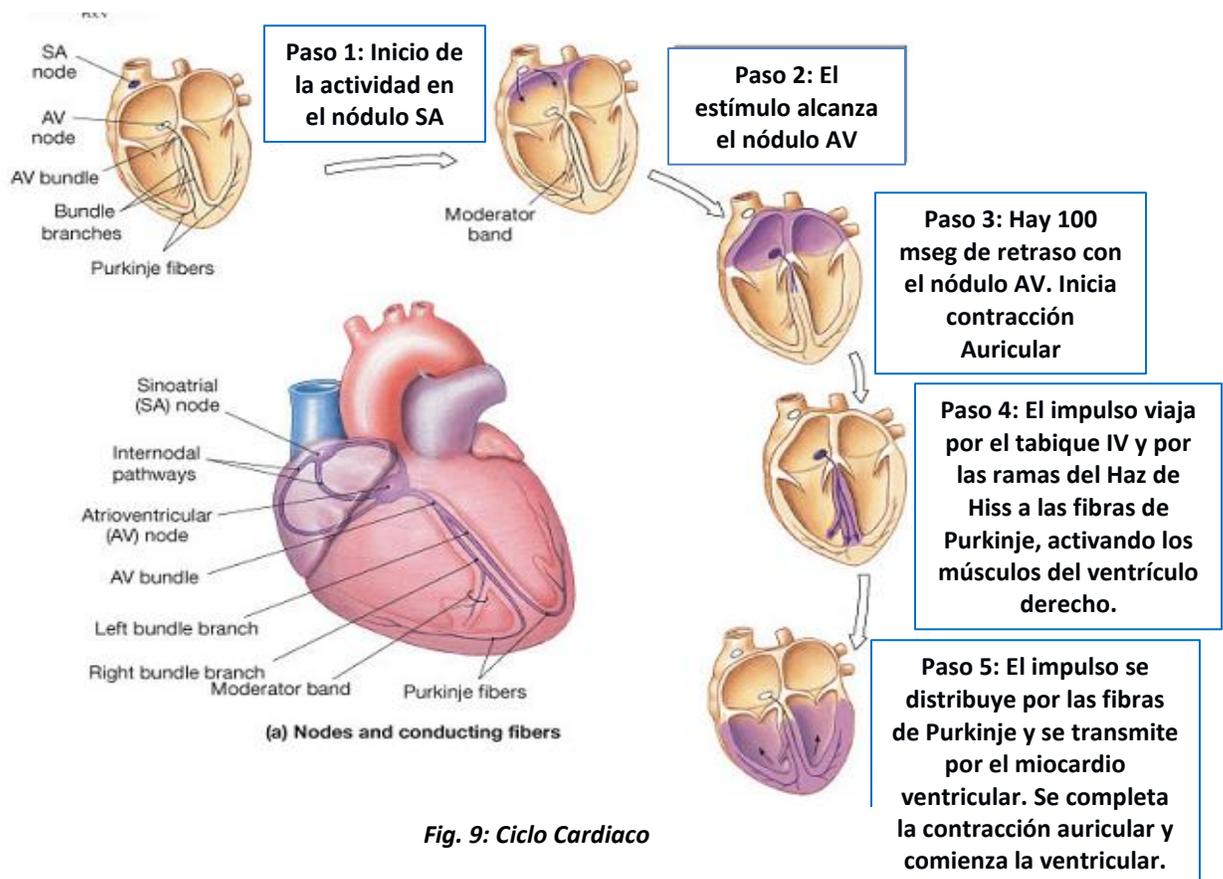


Fig. 9: Ciclo Cardíaco

El llenado ventricular está determinado en amplio grado por la presión venosa de llenado; la sangre fluye directamente de las venas a través de las aurículas a los ventrículos, la contracción auricular simplemente colma los ventrículos casi llenos de sangre. Así la contracción del músculo cardiaco puede dividirse en dos fases; la primera es una contracción isométrica durante la cual la tensión en el músculo y la presión del ventrículo aumentan rápidamente. La segunda fase es esencialmente isotónica, la presión casi no cambia, con una leve P ventricular se abren las válvulas aorticas y la sangre se expulsa rápidamente.

En el corazón de un mamífero ambos ventrículos expulsan el mismo volumen de sangre pero las P generadas en el circuito pulmonar son mucho más bajas, en consecuencia el trabajo ( $P \times V$ ) realizado por el ventrículo derecho es mucho menor que el realizado por el ventrículo izquierdo. La sangre es expulsada del ventrículo cuando la P ventricular supera la P arterial. Si la P arterial es alta se realiza más trabajo para elevar la P ventricular.

El llenado ventricular está determinado en amplio grado por la presión venosa de llenado; la sangre fluye directamente de las venas a través de las aurículas a los ventrículos, la contracción auricular simplemente colma los ventrículos casi llenos de sangre. Así la contracción del músculo cardiaco puede dividirse en dos fases; la primera es una contracción isométrica durante la cual la tensión en el músculo y la presión del ventrículo aumentan rápidamente. La segunda fase es esencialmente isotónica, la presión casi no cambia, con una leve P ventricular se abren las válvulas aorticas y la sangre se expulsa rápidamente.

En el corazón de un mamífero ambos ventrículos expulsan el mismo volumen de sangre pero las P generadas en el circuito pulmonar son mucho más bajas, en consecuencia el trabajo ( $P \times V$ ) realizado por el ventrículo derecho es mucho menor que el realizado por el ventrículo izquierdo. La sangre es expulsada del ventrículo cuando la P ventricular supera la P arterial. Si la P arterial es alta se realiza más trabajo para elevar la P ventricular.

### **3.3 VOLUMENES Y GASTO CARDIACO**

El *Gasto Cardiaco* es el volumen de sangre bombeada por un ventrículo en una unidad de tiempo. En los animales mamíferos se define como el volumen expulsado por el ventrículo derecho o izquierdo, no como la suma de volumen de ambos ventrículos.

El volumen de sangre expulsado en cada latido del corazón se denomina *Volumen Sistólico* y el *Volumen Sistólico Medio* puede determinarse dividiendo el gasto cardiaco por la frecuencia cardiaca. El *Volumen Sistólico* se establece con la diferencia entre el *Volumen Diastólico Final* (volumen del ventrículo justo antes de la contracción) y el *Volumen Sistólico Final* (volumen del ventrículo al terminar la contracción).

El *Volumen Diastólico Final* se halla determinado por:

- 1- La P venosa de llenado,
- 2- Las P generadas durante la contracción auricular,
- 3- La distensibilidad e la pared ventricular,
- 4- El tiempo disponible para el llenado del ventrículo.

El *Volumen Sistólico Final* está determinado por:

- 1- La P generada durante la sístole ventricular,
- 2- La P en el conducto de salida del corazón (Aorta o Pulmonar)

Starling observó que el aumento en la presión venosa de llenado causa un aumento en el volumen sistólico final y provoca un volumen sistólico aumentado. El volumen sistólico final también aumenta pero no tanto como el volumen diastólico final. Así pues, en el musculo cardiaco el estiramiento del musculo relajado (dentro de cierto rango de longitudes) provoca el desarrollo de una mayor tensión durante la contracción. Starling también observó que los aumentos de presión arterial causan tanto aumento del volumen diastólico final como volumen sistólico final, con muy poco cambio en el volumen sistólico. En este caso el trabajo que se requiere para mantener el volumen sistólico frente a una elevada presión arterial proviene del aumento en el estiramiento que sufre el músculo durante la diástole. Las curvas derivadas de la medida del trabajo realizado por el musculo a diferentes presiones venosas se conocen como *Curvas de Starling*.

La *Frecuencia Cardiaca* se ve modificada por la inervación del *Sistema Nervioso Autónomo*, se incrementa por acción de los nervios simpáticos, aumentando la velocidad de conducción a todo el corazón para producir un latido sincrónico más próximo del ventrículo. Así se expulsa del corazón el mismo volumen sistólico en menor tiempo. La disminución del tiempo en el llenado y vaciado del corazón no influye significativamente en el volumen sistólico, tan solo a frecuencias cardiacas muy elevadas éste disminuye.

Al aumentar la frecuencia cardiaca se asegura un vaciado ventricular más rápido, presiones de llenado altas y por lo tanto un llenado ventricular más rápido. Sin embargo existen límites para el acortamiento de la diástole. Las contracciones del corazón ocluyen los capilares coronarios, de manera que el flujo se reduce mucho durante la sístole, pero aumenta en la diástole. Un descenso en el periodo diastólico tiende a reducir el periodo de flujo sanguíneo coronario y por consiguiente la nutrición del corazón. Los nervios simpáticos desempeñan un papel importante al determinar la relación entre frecuencia cardiaca y el volumen sistólico.

#### **4. HEMODINAMICA**

Las contracciones del corazón generan el flujo de sangre a través de los vasos que forman el sistema circulatorio. En los vertebrados y otros animales con circulación cerrada la

sangre fluye por un circuito continuo. La sangre bombeada por el corazón puede producir el flujo de un volumen equivalente en cualquier otra parte de la circulación. O sea que en cualquier instante dado fluyen igual cantidad de litros por minuto a través de las arterias, capilares y venas. Si no hay cambio en el volumen total de sangre, una reducción de volumen en una región conduce a un incremento de volumen en otra parte del sistema.

$$Q = \frac{P}{R} > Q = \frac{(P_1 - P_2) \pi r^4}{8 L \eta}$$

**Q: FLUJO O CAUDAL**, denota el volumen de sangre que fluye por un vaso o grupo de vasos en un tiempo dado.

**P:** presión en dos puntos del sistema.

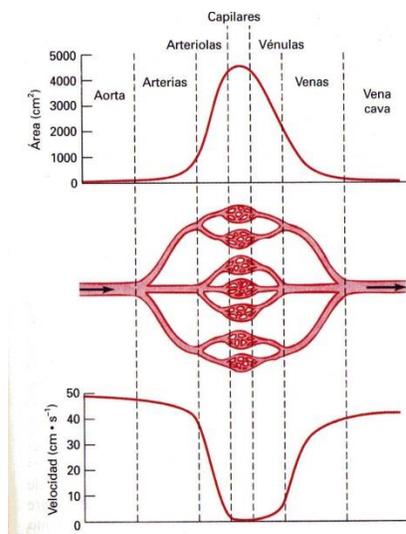
$\pi r^4$ : efecto del radio de los vasos

$\eta$ : viscosidad dinámica

**L:** longitud recorrida

Como **Q** es proporcional al radio, cambios muy pequeños en **r** tienen un profundo efecto sobre el caudal. Duplicar el diámetro de un vaso conducirá a un incremento de 16 veces en el flujo si la diferencia de presión **P<sub>1</sub>-P<sub>2</sub>** no se altera.

**4.1 VELOCIDAD:** La velocidad del flujo denota la distancia que recorre la sangre por un vaso en una unidad de tiempo y no está relacionada con la proximidad al corazón sino con el área de la sección transversal en esta parte de la circulación. El área de la sección transversal no se refiere a la de una sola arteria o capilar sino a la sumatoria de secciones transversales de todos los vasos de un mismo calibre (capilares, venas, arteriolas) en ese punto de la circulación. Las velocidades más elevadas del flujo sanguíneo se producen donde el área de la sección transversal total es más pequeño. Las arterias tienen menor área de sección transversal mientras que los capilares presentan la mayor. Por lo tanto en mamíferos las velocidades más elevadas se producen en la Aorta y la Arteria Pulmonar, luego desciende notablemente a medida que atraviesa los capilares y vuelve a elevarse al fluir por las venas. El flujo lento de la sangre por los capilares tiene significación funcional, puesto que en ellos tiene lugar el intercambio entre la sangre y los tejidos.

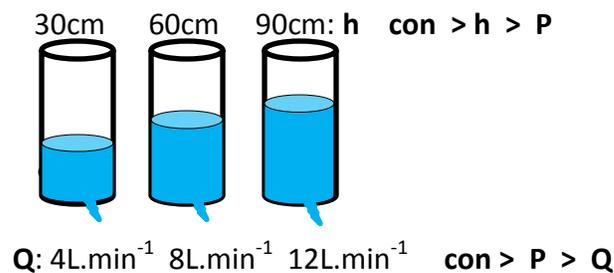


VASOS	SUMATORIA AREA	VELOCIDAD (cm.s <sup>-1</sup> )
AORTA	1	30
ARTERIOLAS	15 a 30	1,5
CAPILARES	750	0,04
VENULAS	60	0,5
GRANDES VENAS	4	8

**Fig. 10:** Gráfica que relaciona la velocidad de la sangre en función de la sumatoria de superficie de los vasos en un punto del sistema.

**4.2 PRESION:** La presión en un vaso sanguíneo es la fuerza que ejerce la sangre contra la pared del vaso, a causa de ella el vaso se distiende debido a su elasticidad. La presión también obliga a la sangre a tratar de salir por cualquier orificio del vaso, lo que significa que la presión normalmente alta en las arterias impulsa la sangre hacia las arteriolas, los capilares y por ultimo las venas. Las presiones generadas en el corazón se disipan con el flujo de la sangre y descienden al pasar ésta del lado arterial al lado venoso de la circulación.

La relación entre la Presión con el caudal sanguíneo: cuando la presión sanguínea es alta en un extremo del vaso y baja en el otro, la sangre trata de fluir del área de mayor P al área de menor P y el caudal **Q** circulante esta en relación directa con la diferencia de **P**.

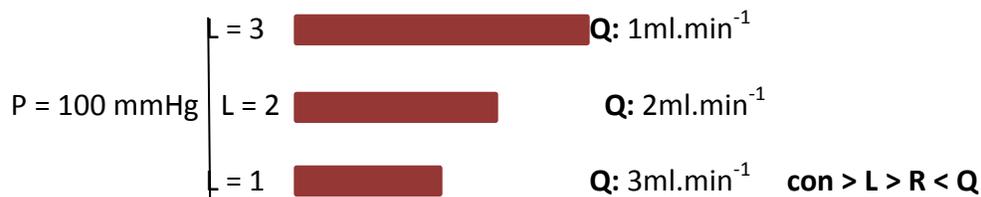


**4.3 RESISTENCIA AL FLUJO:** A menudo es difícil medir los radios de todos los vasos. Se designa el inverso de la ecuación de *Poiseuille* como la resistencia al flujo **R** y equivale a  $\Delta P$  a través del lecho vascular, dividido por el caudal.

$$R = \frac{P_1 - P_2}{Q} = \frac{8 L \eta}{\pi r^4}$$

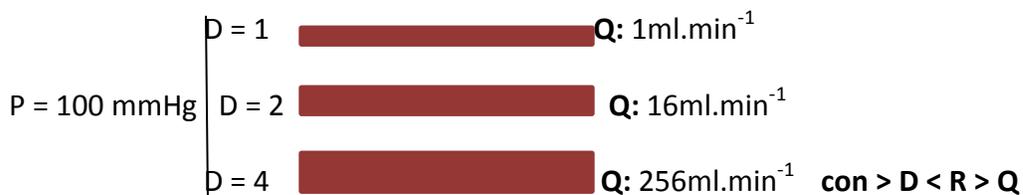
La resistencia al flujo en la circulación periférica es expresada a veces en unidades de resistencia PRV, siendo 1PRV equivalente a la resistencia en un lecho vascular cuando la diferencia de P de 0,13 KPa produce un flujo de 1 ml.seg<sup>-1</sup>.

La resistencia al flujo sanguíneo es idéntica a la fricción, porque la fricción entre la sangre y las paredes vasculares es la que crea un impedimento para la circulación. La resistencia depende de varios factores: longitud -L- y diámetro -D- del vaso y viscosidad de la sangre. Cuanto mayor es la longitud del vaso, tanto más grande la superficie vascular por la que debe fluir la sangre, en consecuencia, mayor la fricción con la paredes. Por ello la resistencia al flujo sanguíneo está en relación directa con la longitud del vaso.

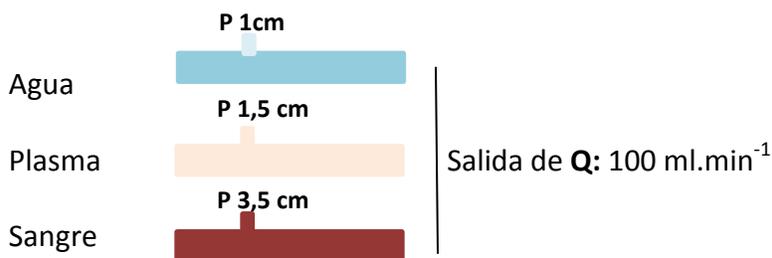


El líquido que fluye por un tubo se retarda solo en las paredes, por ello la velocidad del flujo sanguíneo en la porción media del vaso es muy grande y en la superficie, más lenta. Cuanto mayor el calibre del vaso, tanto más rápidamente puede fluir la columna central de sangre, por lo tanto mayor es el volumen de sangre que pasa por él en 1 minuto.

Si permanecen constantes los demás factores, el flujo de sangre por el vaso está en razón directa del diámetro, elevado a la 4 potencia. Es por esto que modificaciones pequeñas en el diámetro del vaso pueden causar grandes cambios en el flujo de sangre.



Cuanto más viscoso es el líquido que fluye por un tubo, tanto mayor será su fricción con la pared y, en consecuencia, mayor resistencia habrá. Por ej: la viscosidad comparativa de agua: plasma: sangre es de 1:1,5:3,5 respectivamente. El factor más importante para regular la viscosidad de la sangre es la concentración de eritrocitos.



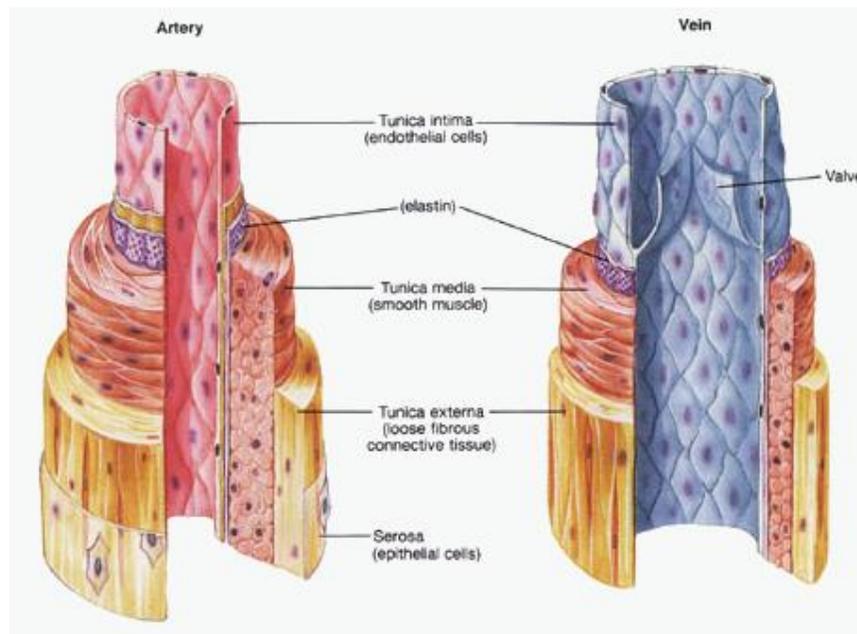
En todos los casos el volumen de líquido que fluye es de 100 ml.min<sup>-1</sup>, pero por la diferencia de viscosidad de los 3 líquidos, varía la presión necesaria para hacer pasar el líquido por el conducto. La altura del líquido en el tubo vertical es índice de la Presión necesaria para crear la circulación.

**4.4 ADAPTABILIDAD DE LOS VASOS:** Los vasos sanguíneos no son tubos rígidos y rectos sino que contienen fibras elásticas que les permiten distenderse. Al aumentar la P las paredes se estiran y el volumen del vaso se amplía. La relación del cambio de volumen respecto del cambio de presión se denomina adaptabilidad o capacitancia del sistema. Con mayor volumen inicial y más elasticidad de las paredes habrá mayor adaptabilidad. El sistema venoso es muy adaptable, pequeños cambios de presión pueden provocar grandes alteraciones de volumen. Por eso el sistema venoso puede actuar como reservorio de volumen.

## 5. EL SISTEMA ARTERIAL

Consiste en una serie de vasos ramificados, adaptados para conducir la sangre del corazón hasta los capilares de los tejidos. En general las arterias poseen paredes más gruesas y muchas más fibras musculares lisas que las venas de semejante calibre. En algunas venas se halla ausente el tejido muscular. Los tubos elásticos son inestables y tienden a hincharse. En los vasos esto se evita por una capa de colágeno que limita la expansión del vaso. Las arterias realizan cuatro funciones principales: i) actuar como conducto para la sangre entre el corazón y los capilares; ii) actuar como reservorio de presión para forzar el paso de la sangre en las arteriolas de pequeño diámetro; iii) amortiguar las oscilaciones de presión y flujo generadas por el corazón para producir un flujo más continuo en los capilares; iv) controlar la distribución de sangre a las distintas redes de capilares a través de una vasoconstricción selectiva de las ramificaciones terminales del árbol arterial.

La presión arterial se controla con mucha precisión. La presión se determina por medio del volumen de sangre que contiene el sistema arterial y las propiedades de sus paredes. Si cualquiera de ambos es alterado, variará la presión. El volumen de sangre en las arterias es resultado de su llenado por las contracciones del corazón y su vaciado en los capilares a través de las arteriolas. Si aumenta el gasto cardiaco la presión arterial se eleva, mientras que si aumenta el flujo sanguíneo capilar la presión arterial disminuye. El flujo sanguíneo capilar es proporcional a la diferencia de P entre los sistemas arterial y venoso. Como la presión venosa es baja y cambia poco, la presión arterial ejerce el control sobre la velocidad de flujo sanguíneo capilar y es la responsable del mantenimiento de una perfusión adecuada de los tejidos.



**Fig. 11: Comparación de tejidos de los vasos sanguíneos ubicados en un mismo nivel del Sistema Circulatorio: Arteria y Vena.**

Las diferencias de presión a lo largo de las grandes arterias son pequeñas (1 mmHg) pero la presión puede descender considerablemente a lo largo de las pequeñas arterias y arteriolas a causa de las resistencias crecientes al flujo, que se producen al disminuir el diámetro de los vasos. Las propiedades elásticas de las paredes arteriales varían, pero cerca del corazón son muy elásticas y amortiguan las oscilaciones de presión y flujo generadas por las contracciones. Al expulsarse la sangre en el sistema arterial la presión aumenta y los vasos se expanden; cuando se relaja el corazón se mantiene el flujo sanguíneo hacia la periferia por la retracción elástica de las paredes del vaso que causan una reducción en el volumen arterial.

### **5.1 PRESION ARTERIAL**

Las presiones sanguíneas registradas en el sistema arterial son normalmente presiones transmural, es decir, la diferencia de presión entre el interior y el exterior a través de la pared del vaso sanguíneo. La presión en la parte externa de la pared del vaso es generalmente próxima a la ambiental, pero algunos cambios en los tejidos exteriores al vaso pueden tener un notable efecto sobre la presión transmural y, por consiguiente, sobre el diámetro del vaso, en consecuencia, sobre el flujo sanguíneo.

Durante el ciclo cardiaco la presión arterial máxima se denomina Presión Sistólica y la mínima se conoce como Presión Diastólica; la diferencia corresponde al Pulso de Presión. Las presiones transmural se expresan típicamente en mmHg y se conoce como máxima/mínima: 120/80 mmHg (12/8 cmHg).

Las oscilaciones de presión producidas por las contracciones y relajaciones del ventrículo se reducen al entrar en los lechos capilares y no existen en el sistema venoso. El pulso de presión viaja a una velocidad de 3 a 5 m.seg-1. La velocidad del pulso de presión aumenta con la disminución del diámetro arterial y el aumento de la rigidez de las paredes arteriales. En las pequeñas arterias puede llegar a 15 y 35 m.seg-1.

Cuando una persona está recostada el corazón se halla al mismo nivel que los pies y la cabeza, por lo tanto las presiones son semejantes. Si la persona se pone de pie la relación entre la cabeza, el corazón y las extremidades cambia con respecto a la gravedad. El resultado es un incremento en la presión arterial de las extremidades inferiores y un descenso de la presión arterial de la cabeza, simplemente por acción de la gravedad. Como la gravedad afecta de igual modo a las presiones arterial y venosa, no se ve afectada gravemente la presión en el lecho capilar. Sin embargo se produce una expansión de los vasos sanguíneos, especialmente las venas, que son las más adaptables. Por lo tanto tiende a producirse un estancamiento, particularmente en las venas cuando el animal cambia de posición respecto a la gravedad. Se precisa de una vasoconstricción en las extremidades para evitar el estancamiento de la sangre. Este problema es más acuciante en unas especies más que en otras, por ej. En la jirafa. El mecanismo de control más probable es una dilatación y constricción general en las arteriolas que conducen a lechos capilares en todo el cuerpo.

## 5.2 PRESION SANGUINEA Y RESISTENCIA PERIFERICA

Varias de las funciones del sistema circulatorio dependen del mantenimiento de las presiones elevadas y relativamente constantes. El mantenimiento de presiones adecuadas es necesario por ej. para mantener la filtración glomerular en el riñón, la transferencia de fluidos nutritivos a los tejidos, la locomoción de muchos invertebrados, la erección de órganos copuladores en vertebrados.

La presión sanguínea arterial es producto del gasto cardíaco y de la resistencia periférica, que se origina cuando se bombean fluidos viscosos a través de un sistema de tubos estrechos. En condiciones normales la viscosidad sanguínea es relativamente constante, la resistencia periférica se regula por alteración en el diámetro de los vasos sanguíneos, cosa que ocurre fundamentalmente en las arteriolas por la musculatura lisa. Para variar el diámetro de estos vasos se originan reflejos vasomotores que controlan la presión y el flujo en distintas áreas. Los centros vasomotores están localizados en la base de la médula. Un grupo de reflejos activados por los cambios de presión en las grandes venas, en la aurícula derecha, en los cuerpos aórticos y carotídeos, provocando los adecuados ajustes de presión sanguínea.

Los receptores de dolor y temperatura, así como los receptores del peritoneo y de las vísceras, pueden activar los reflejos vasopresores. Las arteriolas más finas (metaarteriolas) constituyen esfínteres precapilares o llaves de paso y sus contracciones pueden variar la circulación de muchos puntos. Las anastomosis arteriovenosas pueden desviar la sangre evitando determinadas regiones.

## 6. SISTEMA VENOSO

Actúa como un sistema de retorno de la sangre desde los capilares hasta el corazón. Es un sistema de gran volumen y de baja presión con vasos de gran diámetro interno. En los mamíferos el 50% del volumen sanguíneo total se halla contenido en las venas. Las paredes de las venas son mucho más delgadas que las de las arterias. La adaptabilidad venosa está relacionada con su gran volumen más que con la elasticidad de sus paredes.

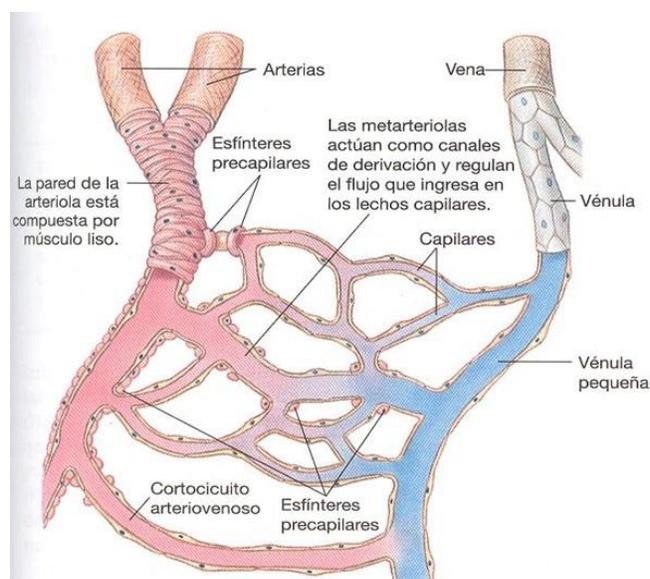
El flujo de sangre en las venas está afectado por una serie de factores, además de las contracciones del corazón. La actividad de los músculos de las extremidades y la presión ejercida por el diafragma sobre el abdomen provocan la compresión de las venas en estas partes del cuerpo y, junto con la presencia de las válvulas en nido de golondrina, permiten el flujo solo en dirección al corazón, aumentando el retorno de sangre. La respiración en los mamíferos también contribuye al retorno de la sangre al corazón. Tanto éste como las grandes venas se hallan en la caja torácica, la expansión de ésta reduce la presión interna del pecho con el resultado de que se realiza una succión de sangre de las venas de la cabeza y de la cavidad abdominal.

Las paredes de muchas venas se hallan recubiertas con músculo liso inervado por fibras simpáticas adrenérgicas. La estimulación de estos nervios provoca vasoconstricción, esto permite que se produzca cierto sangrado sin que haya descenso de la presión venosa, por ej. en los donantes de sangre, en los cuales hay una pérdida temporal del depósito venoso. El músculo liso colabora en la distribución de la sangre en el sistema. Cuando una persona cambia de posición las fibras simpáticas que inervan las venas de las extremidades, provocan la contracción de los músculos lisos venosos y por consiguiente la redistribución de la sangre estancada. Sin embargo esta constricción es inadecuada para mantener una buena circulación durante un periodo prolongado de ausencia de movimientos de las extremidades (por ej. en los soldados). Esto puede provocar una reducción del retorno venoso, del gasto cardiaco, de la presión arterial y del flujo sanguíneo al cerebro, provocando desvanecimiento.

## 7. CAPILARES

La mayoría de los tejidos tiene una extensa red de capilares, de manera que ninguna célula se encuentre separada por más de 3 o 4 células de un capilar. Esto es para la transferencia de gases, nutrientes y productos de desecho. La pared de los capilares consiste en una sola capa de células endoteliales y aunque estas paredes son delgadas, no se estiran ni rompen con facilidad cuando la presión sanguínea aumenta debido a que tienen un diámetro pequeño. Los capilares tienen normalmente 1 mm de largo y entre 3 y 10  $\mu$  de diámetro. Los eritrocitos deben deformarse para atravesarlo, los leucocitos, que son mayores, pueden quedar allí alojados interrumpiendo el flujo. Se desalojan con un aumento de presión y son barridos hacia los grandes vasos. Los tejidos tienen un número variable de capilares y muestran cierta variación de flujo a través del lecho capilar. En algunos tejidos los esfínteres precapilares parecen hallarse bajo control local, se abren y cierran rápidamente como un parpadeo y alteran así la distribución en el lecho capilar. En otros tejidos, como el cerebro, casi todos los capilares permanecen abiertos, en otro, como la piel, pueden permanecer cerrados durante largos periodos de tiempo.

Los capilares se hallan completamente desprovistos de tejido conectivo y muscular liso, su pared consiste en una sola capa de células endoteliales, rodeadas por una membrana basal de colágeno y mucopolisacáridos. Las paredes son delgadas y frágiles pero a causa de su pequeño diámetro necesitan solo de una tensión de la pared muy pequeña para resistir el estiramiento en

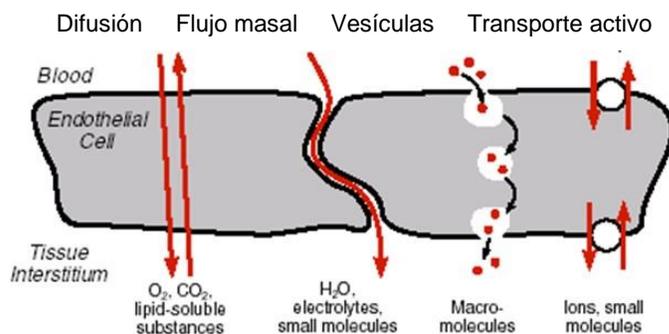


**Fig. 12: Sistema capilar. Esfínteres precapilares.**

respuesta a la presión sanguínea capilar.

La transferencia de sustancias entre la sangre y los tejidos se produce a través de sus paredes, que están especializadas; son más permeables permitiendo el movimiento de sustancias a través del endotelio con relativa facilidad. Las diferencias de permeabilidad de los capilares en los tejidos están asociadas con notables cambios en la estructura. En el cerebro por ej. no son tan permeables como en el hígado o la médula ósea. En el músculo esquelético el grosor de los endotelios tiene de 0,2 a 0,4  $\mu$ .

Las sustancias liposolubles difunden a través de la membrana mientras que el agua y los iones difunden a través de poros llenos de agua. En algunos capilares (cerebrales) existen mecanismos de transporte especiales, por ej. Para la glucosa y algunos aminoácidos. Las macromoléculas pueden moverse a través de las paredes de muchos capilares. Muchas células endoteliales contienen gran número de vesículas, muchas de ellas en asociación



con las superficies interna y externa de la célula. Se ha observado que los materiales son empaquetados por estas vesículas y transportados así a través de las células. Estas vesículas se forman y se fusionan aleatoriamente en cada superficie, por lo tanto el transporte no es direccional,

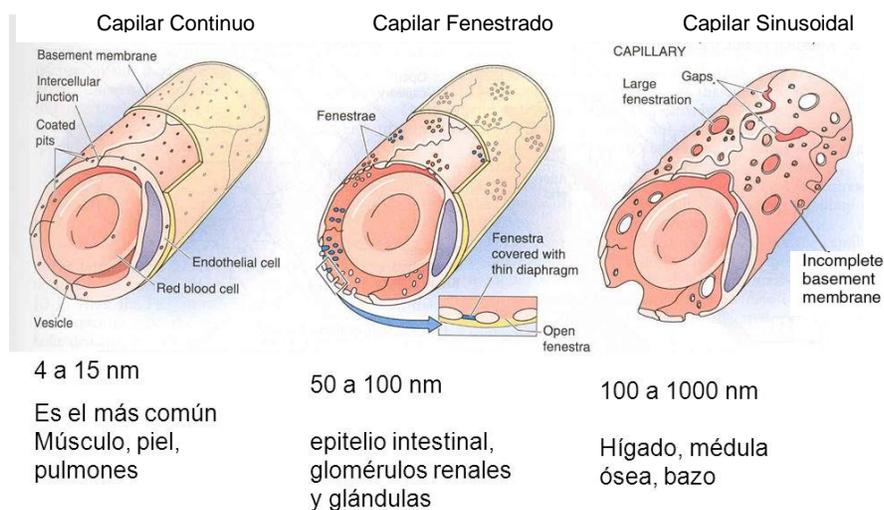
**Fig. 13: Mecanismos de flujo a través del endotelio.** Las sustancias liposolubles, como el  $O_2$  y  $CO_2$  atraviesan por difusión las células epiteliales. El agua y los electrolitos lo hacen mediante flujo masal por los espacios intercelulares (poros). Las vesículas de transporte son mecanismos que movilizan grandes moléculas a través del endotelio. El transporte activo permite difundir iones y otras moléculas pequeñas en contra de su gradiente.

ocurre con gasto de energía para la fusión y fisión de vesículas. En realidad esta teoría está cuestionada porque no permite regular selectividad en el transporte. Otra teoría propone que las vesículas no son móviles en el interior de la célula pero pueden fusionarse formando poros a través de los cuales podrían difundir las sustancias.

En los capilares del glomérulo renal y del intestino las membranas plasmáticas interior y exterior de las células endoteliales se hallan enfrentadas en ciertas regiones y se forman agujeros a través de las células. Estas paredes capilares se conocen como endotelio *Fenestrado*, por lo que se consideran permeables a prácticamente todo, excepto grandes proteínas y eritrocitos.

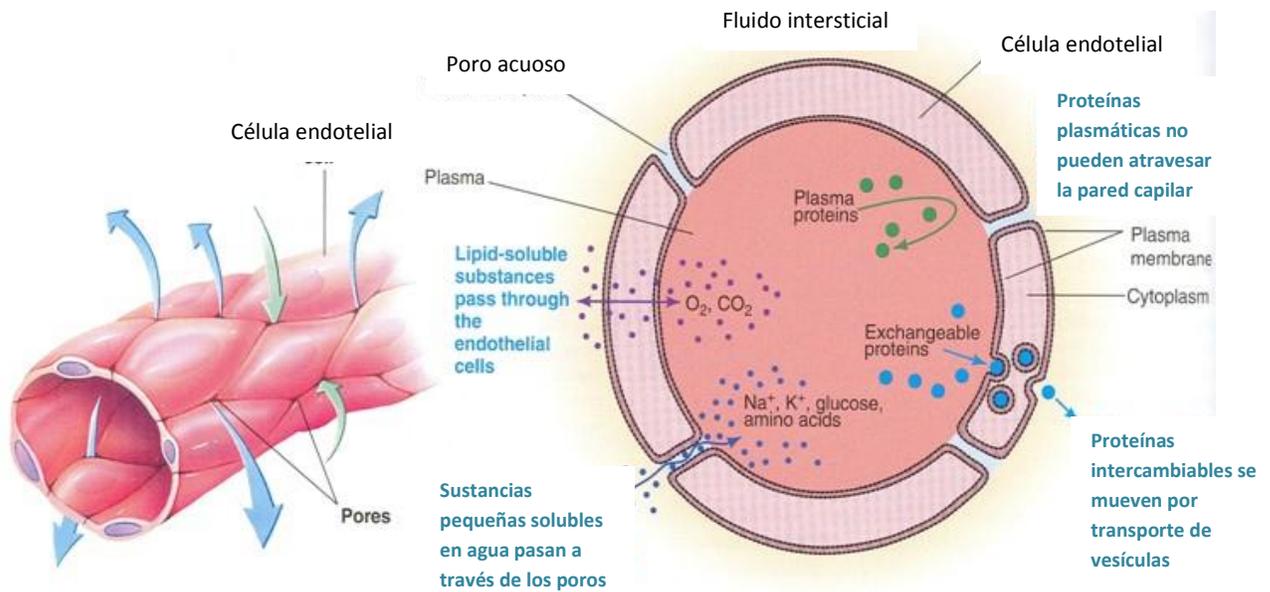
En los capilares cerebrales, que son denominados *Continuos* y son menos permeables, hay muchas menos vesículas, sin embargo también se considera que se debe a las uniones estrechas entre las células, que restringen el paso paracelular entre los dos lados del tejido epitelial. Los capilares del hígado y médula ósea son de tipo *Sinusoidal* y poseen grandes hendiduras paracelulares, que a diferencia de los endotelios *Fenestrados*, poseen

la membrana basal interrumpida con perforaciones. Como resultado el líquido que rodea a los capilares del hígado tiene prácticamente la misma composición que el plasma. En los capilares cerebrales, que son denominados *Continuos* y son menos permeables, hay muchas menos vesículas, sin embargo también se considera que se debe a las uniones estrechas entre las células, que restringen el paso paracelular entre los dos lados del tejido epitelial. Los capilares del hígado y médula ósea son de tipo *Sinusoidal* y poseen grandes hendiduras paracelulares, que a diferencia de los endotelios *Fenestrados*, poseen la membrana basal interrumpida con perforaciones. Como resultado el líquido que rodea a los capilares del hígado tiene prácticamente la misma composición que el plasma.



**Fig. 14: Clasificación de los capilares según su permeabilidad.**

Este mecanismo aumenta la eficacia de la transferencia. El movimiento neto de líquido, en cualquier punto a lo largo del capilar, se halla determinado por la diferencia entre la presión sanguínea y la presión coloidosmótica y por la permeabilidad de la pared capilar. Si consideramos al capilar en toda su extensión, en el extremo arterial la presión sanguínea es mayor que la presión coloidosmótica, se filtra líquido de la sangre hacia los espacios intercelulares. La presión sanguínea desciende a lo largo del capilar, de modo que en el extremo venoso la presión coloidosmótica supera a la presión sanguínea, por lo tanto el líquido regresa a la sangre desde los espacios intersticiales. Aunque no regrese todo el líquido filtrado no se acumula en los tejidos, sino que es devuelta la circulación por el sistema linfático. Este flujo global de líquido causa el intercambio de gases, nutrientes y desechos, entre la sangre y los tejidos. Si se produce un aumento en la presión capilar o una disminución de la presión coloidosmótica (por pérdida de proteínas plasmáticas, por ej) se producirá un incremento en la pérdida de líquido hacia el espacio intersticial.



**Fig. 15: Permeabilidad del capilar e intercambio de sustancias en los tejidos.**

## 7.1 REGULACIÓN NERVIOSA DEL FLUJO CAPILAR

El flujo sanguíneo capilar se ajusta para cubrir las demandas de los tejidos y este ajuste puede darse por control local o nervioso. El control nervioso sirve para mantener la presión arterial por medio del ajuste de la resistencia al flujo sanguíneo en la circulación periférica. El cerebro y el corazón deben ser perfundidos con sangre constantemente y el control nervioso de las arteriolas mantiene este flujo prioritario reduciendo el de otros órganos.

Las arteriolas están inervadas por nervios simpáticos que se caracterizan por liberar normalmente noradrenalina (adrenérgicos). Un efecto generalizado de la estimulación simpática es causar la vasoconstricción periférica y una elevación de la presión arterial. La noradrenalina reacciona preferentemente con los receptores  $\alpha$  del músculo liso y provoca un incremento en su tensión. La estimulación de los receptores  $\beta$  tiene frecuentemente como resultado de la vasodilatación. Estos receptores normalmente responden a los cambios en los niveles de catecolaminas circulantes. Son liberadas a la circulación por neuronas adrenérgicas y por células de la médula suprarrenal principalmente. Las catecolaminas en el sistema circulatorio actúan sobre ambos receptores ( $\alpha$  y  $\beta$ ), pero a bajas concentraciones dominan la estimulación de los receptores  $\beta$ , produciéndose vasodilatación y disminución de resistencia periférica.



capilar se puede mantener con una presión relativamente baja, evitando la formación de grandes espacios extracelulares que perjudicarían la transferencia de gases del pulmón.

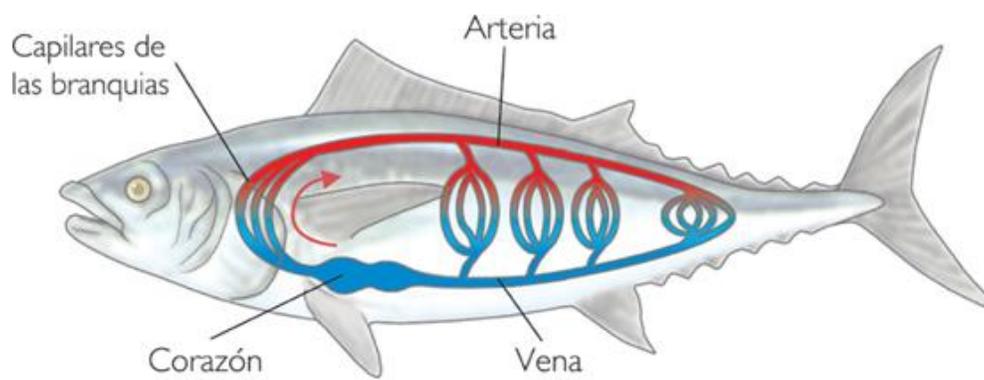
La ventaja de este corazón dividido se debe a que el flujo sanguíneo hacia los pulmones y el resto del cuerpo puede mantenerse con diferentes presiones. La desventaja sería que el gasto cardiaco es igual en ambos lados del corazón a fin de evitar desplazamientos del volumen sanguíneo des circuito sistémico al pulmonar, independientemente de las necesidades de ambos circuitos.

En el resto de los vertebrados; peces pulmonados, anfibios, reptiles, embriones de aves y fetos de mamíferos se encuentra un ventrículo único o dos parcialmente divididos o, con mecanismos que permiten la derivación de sangre de un circuito a otro, generalmente del lado pulmonar al sistémico. La sangre que regresa del cuerpo, en vez de ser bombeada hacia el pulmón, se desvía del lado derecho al izquierdo del corazón y vuelve a ser expulsada, eludiendo a los pulmones.

## 8.2 PECES

Poseen un corazón dividido en cuatro cámaras en serie; *Seno venoso*, *Aurícula*, *Ventrículo* y *Cono arterial*. Todas ellas son contráctiles, excepto el Cono arterial, que es elástico. Se mantiene un flujo unidireccional a través del corazón por medio de válvulas en las conexiones senoauricular, auriculoventricular y a la salida del ventrículo. La sangre bombeada por el corazón a través de la Aorta ventral, pasa primero por las branquias y de ahí, por la Aorta dorsal, abastece al resto del cuerpo. En los capilares branquiales se necesita un flujo sanguíneo continuo y uniforme para lograr un intercambio de gases eficaz.

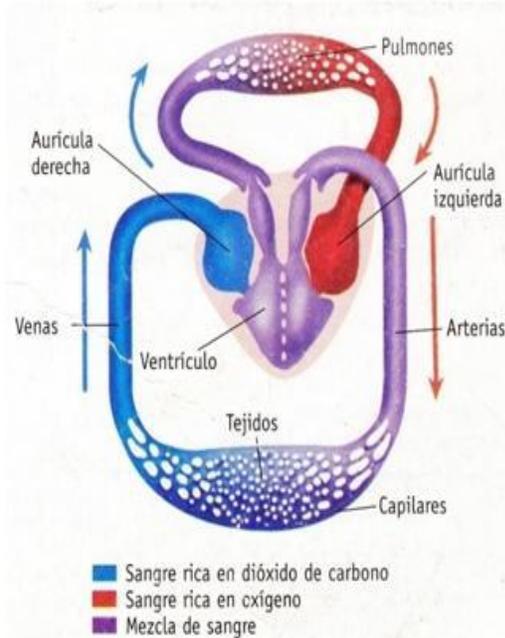
El Bulbo, la Aorta ventral y las arterias que conducen a las branquias son muy adaptables y actúan suavizando y manteniendo el flujo en las branquias frente a las grandes oscilaciones producidas por las del corazón. La Aorta dorsal que recibe la sangre procedente de las branquias, es mucho menos elástica que la Aorta ventral. Así, se logra que la adaptabilidad se encuentre antes y no después de las branquias.



**Fig. 17: Sistema Circulatorio de Peces**

### 8.3 ANFIBIOS

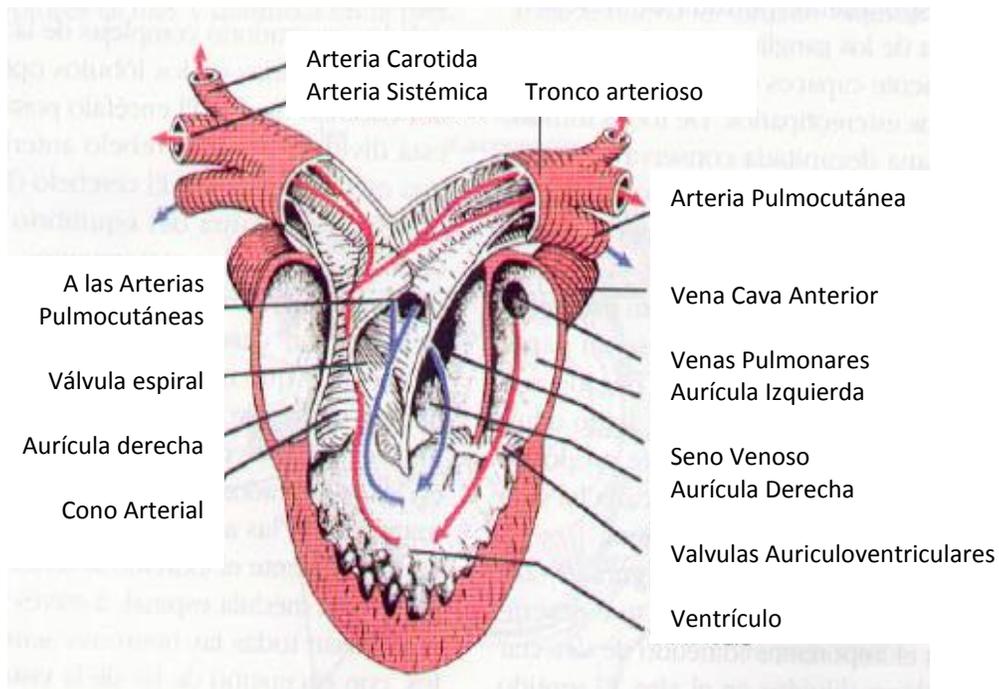
En anfibios las aurículas están completamente divididas pero cuentan con un solo ventrículo. En las ranas por ej., hay una separación de la sangre en el corazón; la sangre que procede de los pulmones y de la piel se dirige preferentemente hacia el cuerpo,



**Fig. 18: Sistema Circulatorio de Anfibios**

mientras que la sangre desoxigenada del cuerpo se dirige hacia el arco Pulmocutáneo. Esta separación de sangre oxigenada y desoxigenada se produce con ayuda de un pliegue espiral ubicado en el Cono arterioso del corazón, a nivel de la Aorta ventral que sale del lado derecho del corazón. La sangre desoxigenada abandona el ventrículo al principio de la sístole y entra en la circulación pulmonar.

La Presión aumenta en el Arco pulmocutáneo y se hace semejante a la del Arco sistémico. Cuando la Presión aumenta el tronco arterial se contrae y el pliegue espiral se mueve de manera que toda la sangre que sale del ventrículo durante la última parte de la contracción es impelida a la porción ventral del sistema arterial, que se dirige a los arcos sistémicos y carotídeos.



**Fig. 19: Corazón de Anfibio**

El flujo de volumen a los pulmones o al cuerpo está inversamente relacionado con la resistencia de ambos circuitos al flujo sanguíneo. Inmediatamente después de un ciclo respiratorio la resistencia al flujo de sangre a través del pulmón es baja y el flujo sanguíneo elevado. Luego la resistencia aumenta gradualmente y disminuye el flujo. Estas oscilaciones de flujo en el pulmón son posibles debido a la división parcial del corazón, que puede ajustar la relación entre flujo sanguíneo pulmonar y sistémico.

Cuando el animal respira se mantiene una distribución más equitativa de sangre a los pulmones y al cuerpo. Durante la evolución del estadio de larva a adulto ocurre el paso de la respiración branquial a pulmocutánea y se observan modificaciones en la circulación sanguínea. De los 6 Arcos branquiales que forman la serie original, los dos primeros desaparecen, el 3<sup>ro</sup> origina la Arteria Carótida, el 4<sup>to</sup> formará el Arco sistémico, el 5<sup>to</sup> se conserva en algunos Urodelos (ranas y sapos), el 6<sup>to</sup> arco se convierte en la Arteria Pulmonar y pierde su conexión con la Aorta dorsal, emite ramificaciones cutáneas para llevar la sangre desoxigenada a la piel.

#### **8.4 REPTILES**

A excepción de los cocodrilos, los reptiles poseen un ventrículo parcialmente dividido y dos arcos sistémicos, derecho e izquierdo. Los cocodrilos, en cambio, poseen dos ventrículos separados. En tortugas, serpientes y lagartos el ventrículo está parcialmente dividido por un tabique musculoso incompleto, llamado tabique horizontal o Cresta muscular o Muskelleiste. Tres troncos arteriales nacen directamente del ventrículo: las Aortas derecha e izquierda y el tronco pulmonar. La abertura de éste último se halla frente al lado derecho del ventrículo por lo que recibe principalmente sangre venosa. El arco sistémico izquierdo se abre frente al tabique ventricular incompleto y recibe sangre mezclada mientras que el arco sistémico derecho se abre en el lado izquierdo del ventrículo y lleva principalmente sangre arterial.

La aurícula derecha se contrae un poco antes de que lo haga la aurícula izquierda y expulsa la sangre desoxigenada a la cavidad pulmonar (circuito derecho). La Presión diastólica de la arteria pulmonar es menor que la Presión diastólica sistémica, como resultado las válvulas pulmonares se abren primero cuando se contrae el ventrículo.

En tortugas puede haber cierta recirculación de la sangre arterial en el circuito pulmonar debido a una derivación izquierda-derecha en el corazón. El flujo relativo hacia los pulmones y los circuitos sistémicos queda determinado por la resistencia al flujo en cada parte del sistema. Cuando la tortuga respira, la resistencia al flujo circulatorio pulmonar es baja, por lo tanto el flujo sanguíneo elevado. Cuando el animal está sumergido no respira, la resistencia en el tejido pulmonar se eleva pero en el circuito sistémico disminuye, dando como resultado una derivación derecha-izquierda y una disminución del flujo sanguíneo pulmonar.

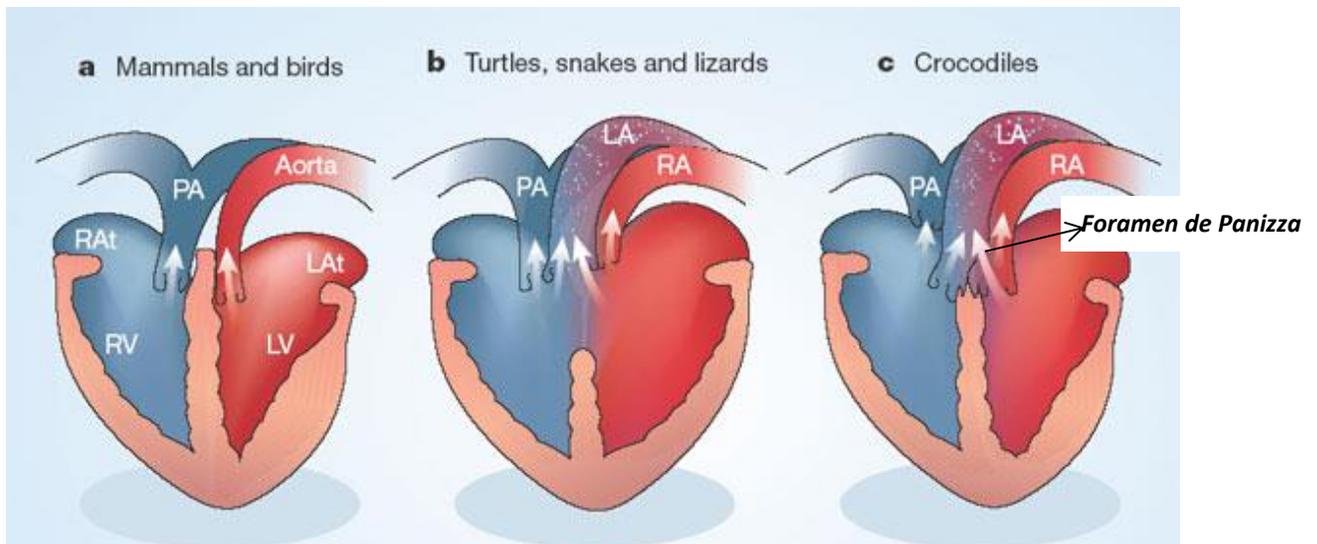


Fig. 20: Comparación del corazón de a) Mamíferos y Aves, b) Reptiles no cocodrilianos y c) Reptiles cocodrilianos.

separación de cámaras. También poseen dos arcos sistémicos: el izquierdo, que parte del ventrículo derecho y el derecho, que procede del ventrículo izquierdo y ambos se hallan conectados a través del *Foramen de Panizza*. Cuando el cocodrilo respira las presiones generadas en el ventrículo derecho son menores que las del izquierdo. La sangre es bombeada por el ventrículo izquierdo en el arco sistémico derecho e izquierdo a través del *Foramen de Panizza*. Debido a las diferencias de Presión entre ambos ventrículos las válvulas de la base del arco sistémico izquierdo permanecen cerradas a lo largo del ciclo cardiaco. Toda la sangre del ventrículo derecho pasa al arco pulmonar. Este funcionamiento es idéntico al de los mamíferos, sin embargo el reptil tiene la capacidad de derivar sangre entre ambos circuitos cuando interrumpe su respiración y se sumerge al agua. En este momento aumenta la resistencia al flujo sanguíneo pulmonar y las presiones ventriculares se igualan, en consecuencia las válvulas de la base del arco sistémico izquierdo se abren y la sangre del ventrículo derecho es impulsada a la circulación pulmonar y sistémica. Estamos en presencia de una derivación Derecha-Izquierda.

### 8.5 FETO DE MAMIFERO

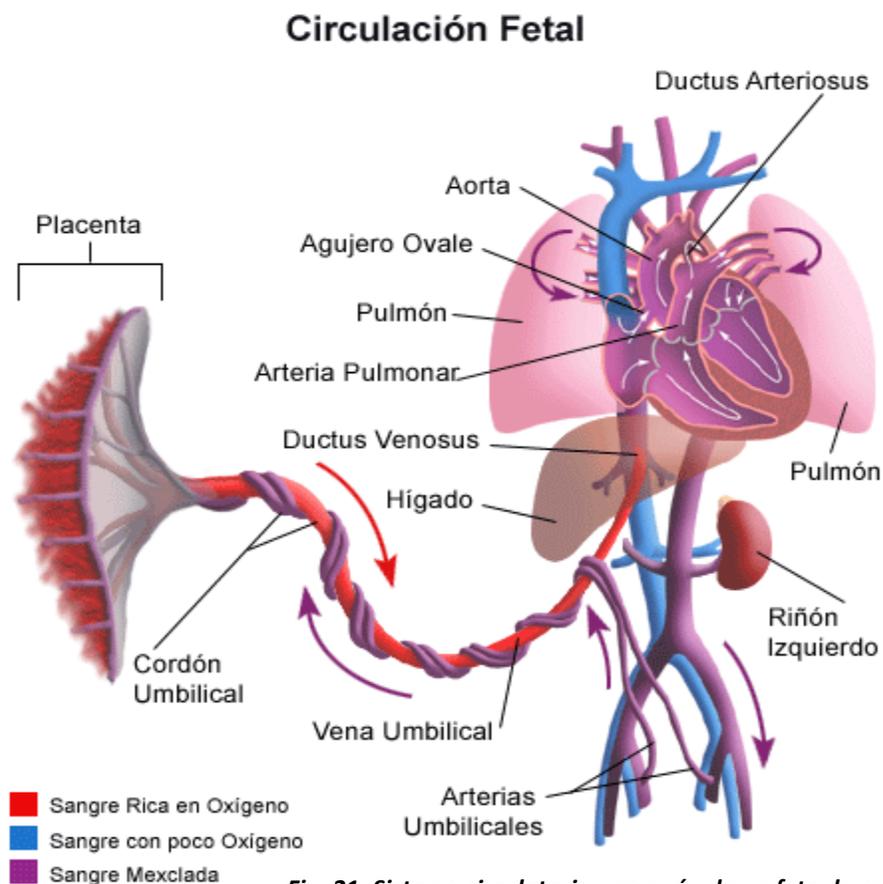
En el feto los pulmones no son funcionales y están llenos de líquido. La presencia de líquido hace que los pulmones sean resistentes al flujo de sangre que les llega y sólo reciben suficiente sangre para sus necesidades de crecimiento y desarrollo. La sangre oxigenada viaja de la placenta al feto a través de la vena umbilical y regresa a la placenta a través de las arterias umbilicales.

La estructura del corazón del feto difiere del corazón post-natal en que hay una abertura en el tabique interauricular llamado *Foramen Oval*. Esto permite que la mayoría de la sangre que llega a la aurícula derecha fluya hacia la aurícula izquierda, en vez lugar de pasar al ventrículo derecho. La segunda característica de la circulación del corazón fetal es la presencia del *Conducto Arterioso*. Este vaso corto y de gran diámetro conecta la

Arteria Pulmonar con la Aorta, por lo tanto la sangre que queda en el ventrículo derecho y es expulsada por el circuito pulmonar para a la Arteria Aorta por el *Conducto Arterioso* realizándose, en conjunto, una gran derivación derecha-izquierda.

Al nacer los mamíferos desvían la circulación placentaria hacia la pulmonar, proceso que implica varios reajustes cardiovasculares. Los pulmones se hinchan, reduciéndose la resistencia al flujo sanguíneo pulmonar; desaparece la circulación placentaria y aumenta la resistencia al flujo en el circuito sistémico. Las Presiones en la aurícula izquierda superan a la Presión de la aurícula derecha, provocando el cierre del Foramen Oval. El Conducto Arterioso se ocluye y no persiste flujo a través de él; por lo tanto la contracción del ventrículo derecho provoca el flujo hacia los pulmones y el ventrículo izquierdo lo hace hacia el circuito sistémico, de forma independiente.

En caso de que el *Conducto Arterioso* permaneciera abierto después del nacimiento, el flujo de sangre hacia los pulmones supera al flujo sistémico, ya que una parte de la sangre ventricular izquierda pasa a través del *Conducto Arterioso* a la Arteria Pulmonar. Así el flujo sistémico no se ve afectado, pero si el flujo pulmonar, que se puede llegar a duplicar. El resultado es una notable hipertrofia del ventrículo izquierdo. La Presión sanguínea en el pulmón es elevada, provocando mayor pérdida de líquido y una probable congestión pulmonar.

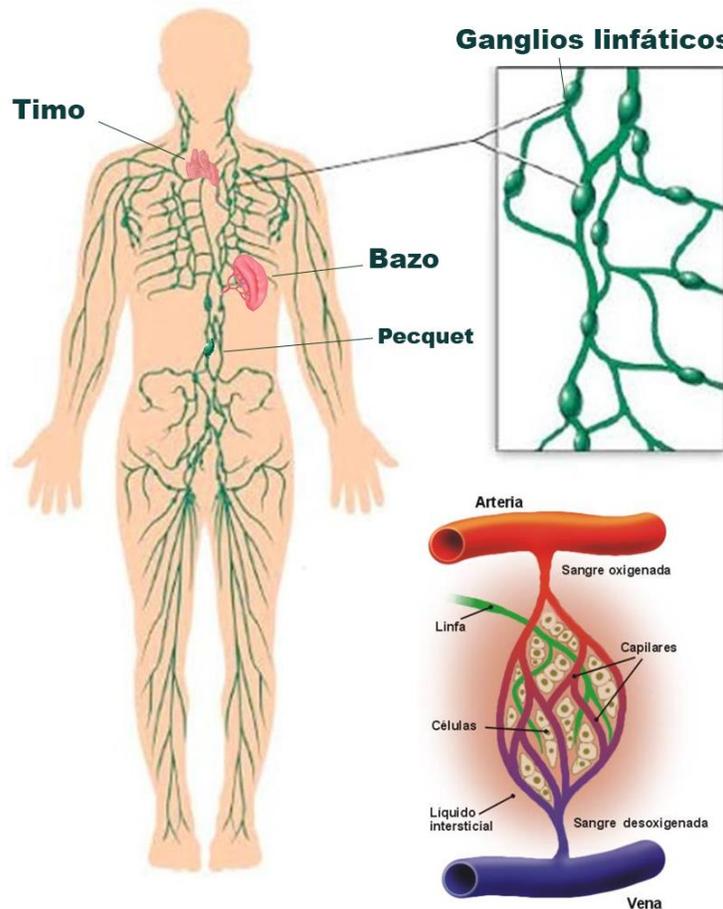


**Fig. 21: Sistema circulatorio y corazón de un feto de mamífero**

## 9. SISTEMA LINFÁTICO

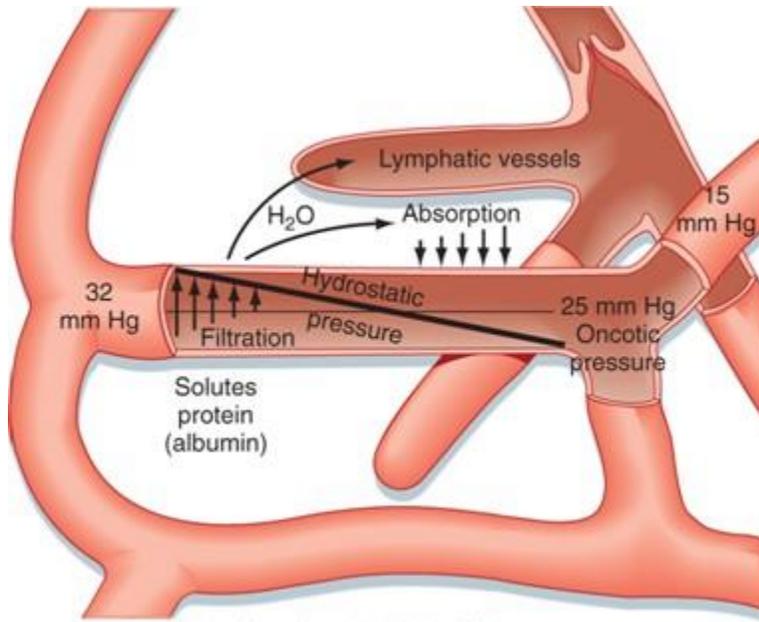
El sistema linfático es un sistema de vasos y órganos linfoides: *Ganglios*, el *Bazo*, el *Timo* y las *Amígdalas*, que recoge y transporta la linfa. Su función se relaciona con el mantenimiento del equilibrio hídrico y proteico de los tejidos, y con la protección contra la invasión de sustancias químicas y microorganismos extraños. La linfa se recoge en los *Capilares* de extremos cerrados que drenan los espacios intersticiales. Estos capilares se unen para formar una estructura arborescente con ramificaciones que alcanzan todos los tejidos. Los vasos linfáticos mayores se parecen a las venas y desembocan a través de un conducto en la circulación sanguínea, en un punto de baja presión. En los mamíferos y algunos otros vertebrados los vasos linfáticos drenan a través de un *Conducto Torácico* en la Vena Cardinal Anterior, cerca de la unión de dicho vaso con la vena yugular interna.

El sistema linfático sirve para devolver a la sangre el exceso de líquido y proteínas filtrados a través de las paredes capilares. Las grandes moléculas, particularmente grasas absorbidas a nivel intestinal y probablemente las hormonas de elevado peso molecular, llegan a la sangre a través del sistema linfático. También se halla implicado en la defensa del organismo frente a la infección, mediante la producción de linfocitos y monocitos en los nódulos linfáticos. La linfa es un líquido transparente, de color ligeramente amarillento, con elevado número de linfocitos.



**Fig. 22: Sistema linfático**

Las paredes de los capilares linfáticos están constituidas por una sola capa de células endoteliales, sin membrana basal o discontinuada y con grandes poros entre células adyacentes, que facilitan el paso del líquido intersticial a los canales linfáticos. Los vasos presentan válvulas y permiten el flujo solo en dirección opuesta a los capilares linfáticos. Los grandes vasos linfáticos están rodeados de musculatura lisa y se contraen



**Fig. 23: Flujo de líquido intersticial y balance de presiones**

rítmicamente generando presiones que producen el avance del líquido. Esto es ayudado por las contracciones intestinales y de los músculos esqueléticos. Muchos ciclóstomos, peces, anfibios y reptiles tienen corazones linfáticos que contribuyen al movimiento del líquido. Una producción de linfa que supere al flujo linfático causará una retención de líquido en los espacios de los tejidos, situación denominada *Edema*.

Los *Ganglios linfáticos* son nódulos pequeños en forma de frijol, de 1 a 2 mm hasta 25 mm, situados a lo largo del trayecto de los vasos linfáticos. Las funciones de los ganglios linfáticos son la de filtrar la linfa de sustancias extrañas, como bacterias y células cancerosas, y destruirlas, así como producir glóbulos blancos, como linfocitos, monocitos y células plasmáticas (inmunoglobulinas) encargados de destruir a las sustancias extrañas.

El *Bazo* está formado por la *Pulpa Blanca*, que rodea las arterias centrales del órgano y se compone de masas de linfocitos y la *Pulpa Roja*, que ocupa el resto del órgano y consta principalmente de sangre que está de paso por el bazo o que se almacena dentro de éste. Sirve como sitio de producción de linfocitos, como área de fagocitosis de eritrocitos viejos, como reservorio de sangre y como lugar de formación de sangre fetal.

El *Timo* produce y madura los linfocitos T, que son enviados al bazo, a las amígdalas y a los ganglios linfáticos. Segrega hormonas que actúan en la maduración de los linfocitos. El Timo presenta macrófagos encargados de la eliminación de los linfocitos T defectuosos. Se atrofia en el adulto.

Hay tres pares de *Amígdalas*, las *Palatinas* están situadas a ambos lados de la cavidad bucal, a la altura del paladar blando. Las *Faríngeas* (adenoides) están situadas en la parte superior de la garganta (nasofaringe) y las *Linguales*, en la base de la lengua. Son pequeñas al nacimiento, aumentan a los 5 años de edad y luego se reducen de tamaño. Su función es liberar linfocitos que reaccionan rápidamente ante la presencia de microorganismos que ingresen por las cavidades bucal y nasal.

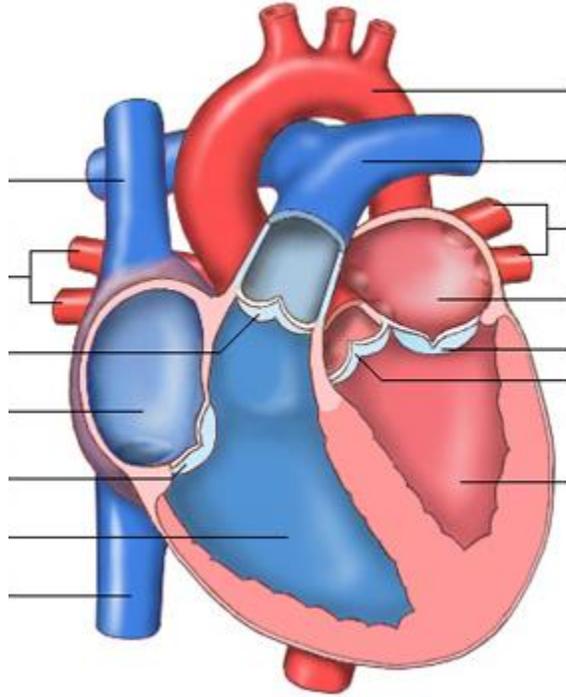
## **BIBLIOGRAFIA**

Randall, D.; Burggren, W. & French, K. 2002. Eckert. Fisiología Animal. Mecanismos y adaptaciones. Interamericana- Mc Graw Hill- 4ta Edición. 790Ppp.

Guyton, A.C. & Hall, J.E. 2001. Tratado de Fisiología Médica. Interamericana-Mc Graw Hill- 10ma Edición. 1280pp.

## ACTIVIDADES

1. Señala en el siguiente grafico las cavidades del corazón, los vasos que entren y salen y los dos circuitos principales.



2. ¿A qué se debe que haya diferencias en la velocidad de propagación del impulso en los distintos tipos de fibras cardiacas?

3. Marca las principales características de la red arterial, venosa y capilar y del sistema linfático.

4. La Ley de Poiseuille establece que el flujo de sangre está regulado por la diferencia de presión a lo largo del sistema y por la resistencia que se opone al paso de sangre.

$$Q = \frac{P}{R} \gg Q = \frac{(P_1 - P_2) \pi r^2}{8 L \eta}$$

Expresa cómo será el flujo de sangre en los siguientes casos:

- En un vaso de gran diámetro respecto de un capilar
- Cuando se presenta un caso de anemia
- Frente a una situación de hipertensión arterial

5. ¿Qué problemas afronta el sistema circulatorio frente a los cambios de posición corporal?
6. Establezca una relación entre: presión del circuito sistémico- presión coloidosmótica- capilares- sistema linfático.