

# Fisiología animal I:

regulación del medio interno y sistemas de soporte vital

Ronald Andreé Vitonera Rogel  
Robinson J. Herrera-Feijoo  
Jhon Bryan Mina Ortiz

# **Fisiología animal I:**

## **regulación del medio interno y sistemas de soporte vital**

---

Ronald Andreé Vitonera Rogel  
Robinson J. Herrera-Feijoo  
Jhon Bryan Mina Ortiz



**© Ronald Andreé Vitonera Rogel**

rvitoner1@utmachala.edu.ec  
Universidad Técnica de Machala  
<https://orcid.org/0000-0002-5272-5551>

**Robinson J. Herrera-Feijoo**

rherrera2@uteq.edu.ec  
Universidad Técnica Estatal de Quevedo  
<https://orcid.org/0000-0003-3205-2350>

**Jhon Bryan Mina Ortiz**

jhon.mina@unesum.edu.ec  
Universidad Estatal del sur de Manabí  
<https://orcid.org/0000-0002-3455-2503>

**ISBN: 978-9942-53-069-1**

**DOI: <http://doi.org/10.48190/9789942530691>**

Distribución online

 Acceso abierto

Primera edición 1/11/2025

**Cita**

Vitonera, R., Herrera-Feijoo, R., Mina, J. (2025) Fisiología animal I: regulación del medio interno y sistemas de soporte vital. Editorial Grupo Compás

Este libro es parte de la colección de la Univesidad Técnica de Machala y ha sido debidamente examinado y valorado en la modalidad doble par ciego con fin de garantizar la calidad de la publicación. El copyright estimula la creatividad, defiende la diversidad en el ámbito de las ideas y el conocimiento, promueve la libre expresión y favorece una cultura viva. Quedan rigurosamente prohibidas, bajo las sanciones en las leyes, la producción o almacenamiento total o parcial de la presente publicación, incluyendo el diseño de la portada, así como la transmisión de la misma por cualquiera de sus medios, tanto si es electrónico, como químico, mecánico, óptico, de grabación o bien de fotocopia, sin la autorización de los titulares del copyright.

## **Prefacio**

Fisiología Animal I: Homeostasis y Sistemas de Soporte Vital en la Práctica Clínica Veterinaria es una obra académica diseñada para adentrarse en los fundamentos que permiten a los organismos mantener un equilibrio vital esencial. En este libro se exploran de manera sistemática los procesos que garantizan la homeostasis y se analizan en detalle los sistemas digestivo, respiratorio, renal y cardiovascular, pilares fundamentales en el funcionamiento de los animales.

El objetivo general de esta obra es proporcionar a los estudiantes de Medicina Veterinaria una herramienta integral que combine teoría y práctica. Se busca facilitar la comprensión de los mecanismos de regulación del medio interno y el funcionamiento de los sistemas de soporte vital, promoviendo el pensamiento crítico y la aplicación práctica de los conocimientos adquiridos en situaciones clínicas reales.

La estructura del libro ha sido organizada de forma progresiva y coherente. Cada capítulo inicia con una sección de apertura que presenta los objetivos de aprendizaje y activa los conocimientos previos del lector. El cuerpo del capítulo desarrolla los conceptos teóricos apoyados en gráficos, tablas y ejemplos aplicados, y culmina con una sección de cierre que incluye resúmenes, ejercicios de autoevaluación y glosario.

Las características pedagógicas de esta obra se fundamentan en el uso de recursos didácticos internos que facilitan la comprensión de conceptos complejos. Se integran elementos visuales y casos clínicos que vinculan la teoría con la práctica, permitiendo una interacción activa con el contenido y estimulando el aprendizaje autónomo. Con esta metodología, se pretende formar profesionales críticos, capaces de aplicar de manera efectiva los principios de la fisiología animal en su ejercicio profesional y en la investigación.

La elaboración de este libro es el resultado de un compromiso con la excelencia académica y la innovación en la enseñanza, con la finalidad de dotar a los futuros médicos veterinarios de las herramientas necesarias para enfrentar los desafíos del campo clínico y científico.

## **Enfoque Metodológico y Estructura del Libro**

La presente obra ha sido elaborada bajo un enfoque integrador de la fisiología animal, orientado a que el estudiante comprenda cómo los organismos mantienen la homeostasis mediante la interacción coordinada de los sistemas de soporte vital. Su propósito central es proporcionar una base científica sólida, actualizada y aplicable a la práctica clínica veterinaria, permitiendo conectar los principios fisiológicos fundamentales con escenarios reales del ejercicio profesional.

### **1. Enfoque metodológico**

El desarrollo del contenido sigue una metodología pedagógica basada en tres ejes:

#### **a) Aprendizaje sistémico e interrelacionado**

Cada capítulo aborda un sistema fisiológico desde su función esencial en la regulación del medio interno, destacando los mecanismos celulares, humorales y neurales que permiten su integración al funcionamiento global del organismo. Este enfoque permite comprender la fisiología como una red dinámica e interdependiente, evitando la fragmentación del conocimiento.

#### **b) Progresión gradual de la complejidad**

Los contenidos avanzan desde conceptos generales hacia procesos específicos y mecanismos de regulación, permitiendo una construcción progresiva del aprendizaje:

1. Conceptualización inicial del sistema y su papel en la homeostasis.
2. Organización anatómica funcional pertinente para comprender la fisiología.
3. Procesos fisiológicos clave y su regulación.
4. Integración con otros sistemas en condiciones fisiológicas y clínicas.

Esta secuencia favorece la comprensión profunda de los mecanismos de control y facilita que el estudiante relacione teoría y práctica.

### **c) Aplicación clínica y comparada en medicina veterinaria**

A lo largo del texto se incorporan ejemplos, situaciones clínicas y comparaciones entre especies, con el fin de:

- ilustrar cómo se manifiestan los procesos fisiológicos en la clínica veterinaria,
- favorecer el razonamiento fisiopatológico,
- y fortalecer la capacidad de interpretar signos, síntomas y parámetros clínicos desde una base fisiológica.

Este enfoque aplicado busca que el estudiante reconozca la utilidad directa del conocimiento fisiológico en el diagnóstico, tratamiento y toma de decisiones clínicas.

## **2. Estructura pedagógica del libro**

Cada capítulo responde a una estructura uniforme que facilita el estudio sistemático y la enseñanza:

1. Introducción: contextualiza el sistema y su relevancia fisiológica.
2. Objetivos de aprendizaje: expresan con claridad lo que el estudiante debe lograr.
3. Desarrollo temático: incluye conceptos clave, mecanismos fisiológicos, control neural y hormonal, comparaciones entre especies y vínculos con la clínica.
4. Enfoque aplicado: integra ejemplos clínicos o situaciones reales que permiten conectar la teoría con la práctica.
5. Actividades de consolidación: promueven el análisis, la aplicación del conocimiento y el pensamiento crítico.
6. Glosario del capítulo: facilita la comprensión de términos esenciales.

Esta estructura garantiza continuidad, claridad y coherencia en la presentación de los contenidos.

### **3. Coherencia e integración entre capítulos**

El libro está organizado de manera que cada capítulo se articula con los anteriores y posteriores, manteniendo como eje central los principios abordados en el Capítulo I: Homeostasis y Regulación del Medio Interno. Cada sistema es explicado en función de:

- su contribución a la homeostasis,
- su interacción con otros sistemas,
- y su papel en el mantenimiento global del equilibrio fisiológico.

Este diseño permite una comprensión integral del organismo, acorde con la lógica de la medicina veterinaria y de la fisiología comparada.

### **4. Aplicación académica y profesional**

La obra está dirigida a estudiantes y docentes de Medicina Veterinaria, proporcionando un material de apoyo confiable para el estudio, la enseñanza y la identificación de conexiones entre la fisiología y la práctica clínica. Su enfoque metodológico permite utilizarlo:

- en clases magistrales,
- como base para estudios autónomos,
- en actividades prácticas,
- y como puente hacia asignaturas clínicas y fisiopatológicas.

### **5. Secuencia de capítulos y recorrido del libro**

El libro se organiza en cinco capítulos que siguen una lógica fisiológica y pedagógica progresiva. El Capítulo I introduce los principios de medio interno,

homeostasis y sistemas de control, que constituyen el eje articulador de toda la obra. El Capítulo II desarrolla el sistema digestivo como puerta de entrada de nutrientes y base del equilibrio energético. El Capítulo III aborda el sistema respiratorio, encargado del intercambio gaseoso y del suministro de oxígeno necesario para la producción de energía. El Capítulo IV se centra en el sistema renal, clave en la regulación del volumen, la osmolaridad y el equilibrio ácido-base. Finalmente, el Capítulo V integra el sistema cardiovascular y el sistema linfático como redes de transporte y defensa que distribuyen sustancias, conectan todos los órganos y cierran el circuito de mantenimiento de la homeostasis. Esta secuencia permite que el lector avance desde los principios generales hacia la comprensión integrada de los sistemas de soporte vital en la práctica clínica veterinaria.

## **Tabla de contenidos**

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Prefacio .....                                                                     | 2  |
| Enfoque Metodológico y Estructura del Libro.....                                   | 3  |
| CAPITULO I.....                                                                    | 12 |
| Medio Interno, Homeostasis y Sistemas de Control de las Funciones Corporales ..... | 13 |
| Medio Interno y Compartimentos de Líquidos Corporales .....                        | 15 |
| Composición y Función del Medio Interno .....                                      | 17 |
| Diferencias Iónicas entre Compartimentos .....                                     | 18 |
| Mecanismos de mantenimiento de gradientes iónicos.....                             | 20 |
| Consecuencias de la alteración de los gradientes .....                             | 21 |
| Regulación del Volumen de Líquidos .....                                           | 21 |
| Homeostasis: Equilibrio Dinámico del Medio Interno .....                           | 23 |
| Ejemplos Prácticos de Homeostasis.....                                             | 24 |
| Sistemas Integrados para el Control Homeostático .....                             | 26 |
| Mecanismos de Control y Retroalimentación .....                                    | 28 |
| Integración y Sinergia Fisiológica.....                                            | 32 |
| CAPITULO II.....                                                                   | 45 |
| Sistema Digestivo .....                                                            | 46 |
| Cavidad oral, saliva y funciones digestivas iniciales .....                        | 48 |
| Cavidad Oral y Anexos.....                                                         | 49 |
| Deglución y tránsito esofágico.....                                                | 52 |
| Estómago y digestión gástrica .....                                                | 52 |
| Intestino Delgado .....                                                            | 54 |
| Intestino Grueso y Absorción de Agua .....                                         | 55 |
| Órganos Accesorios .....                                                           | 55 |

|                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| Fisiología Digestiva: Procesos, Regulación y Aspectos Moleculares ..... | 56  |
| Fases de la Digestión .....                                             | 56  |
| Secreciones Digestivas y Regulación Hormonal.....                       | 57  |
| Digestión y Absorción de Macronutrientes.....                           | 59  |
| Motilidad Gastrointestinal .....                                        | 61  |
| Papel del Hígado y Páncreas en la Digestión .....                       | 63  |
| Papel de la Microbiota Intestinal en Nutrición y Salud Digestiva.....   | 71  |
| Funciones Nutricionales de la Microbiota Intestinal .....               | 71  |
| Regulación Inmunológica y Protección de la Mucosa Intestinal .....      | 72  |
| Interacción Molecular Microbiota-Huésped.....                           | 73  |
| Adaptaciones Digestivas en Especies Veterinarias.....                   | 73  |
| Diferencias entre Monogástricos y Rumiantes.....                        | 74  |
| Rumia y Eructo.....                                                     | 76  |
| Papel de la Microbiota .....                                            | 78  |
| Adaptaciones Digestivas en Aves.....                                    | 80  |
| Adaptaciones Digestivas en Equinos.....                                 | 83  |
| Adaptaciones Digestivas en Conejos.....                                 | 86  |
| Adaptaciones Digestivas en Peces, Reptiles y Animales Exóticos .....    | 90  |
| Interacciones del Sistema Digestivo con Otros Sistemas.....             | 92  |
| Regulación Neuroendocrina del Apetito y Saciedad.....                   | 93  |
| Relación con el Sistema Inmunológico .....                              | 95  |
| CAPITULO III.....                                                       | 106 |
| Sistema Respiratorio .....                                              | 107 |
| Generalidades del sistema respiratorio y organización funcional .....   | 109 |
| Vías respiratorias superiores .....                                     | 110 |
| Vías respiratorias inferiores .....                                     | 112 |

|                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Pulmones y parénquima pulmonar .....                                                                  | 112 |
| Pleura y espacio pleural .....                                                                        | 114 |
| Fisiología Respiratoria: Procesos y Regulación .....                                                  | 114 |
| Mecánica de la Ventilación Pulmonar .....                                                             | 115 |
| Factores que Afectan la Ventilación .....                                                             | 118 |
| Intercambio Gaseoso en los Pulmones y Tejidos .....                                                   | 120 |
| Ley de Fick aplicada a la fisiología pulmonar .....                                                   | 121 |
| Factores que Afectan la Difusión Pulmonar .....                                                       | 124 |
| Intercambio Gaseoso en los Tejidos .....                                                              | 125 |
| Mecanismos de Adaptación al Intercambio Gaseoso .....                                                 | 126 |
| Transporte de Gases en la Sangre .....                                                                | 130 |
| Regulación de la Respiración .....                                                                    | 135 |
| Relación del Sistema Respiratorio con el Equilibrio Ácido-Base .....                                  | 139 |
| Surfactante Pulmonar .....                                                                            | 142 |
| Índice Ventilación-Perfusión (V/Q) .....                                                              | 143 |
| Efectos Bohr y Haldane .....                                                                          | 144 |
| Adaptaciones respiratorias en ejercicio, estrés y variabilidad comparada en especies domésticas ..... | 146 |
| Adaptaciones respiratorias durante el ejercicio y estrés .....                                        | 146 |
| Variaciones comparativas en especies domésticas .....                                                 | 147 |
| Interacciones del Sistema Respiratorio con Otros Sistemas .....                                       | 149 |
| Relación con el Sistema Cardiovascular .....                                                          | 150 |
| Relación con el Sistema Nervioso .....                                                                | 150 |
| Relación con el Metabolismo y la Termorregulación .....                                               | 151 |
| CAPITULO IV .....                                                                                     | 167 |
| Sistema Renal .....                                                                                   | 168 |

|                                                         |     |
|---------------------------------------------------------|-----|
| Anatomía funcional del sistema renal .....              | 170 |
| Riñones.....                                            | 170 |
| Irrigación renal .....                                  | 173 |
| La nefrona: unidad estructural y funcional .....        | 174 |
| Vías Urinarias .....                                    | 178 |
| Fisiología Renal: Procesos y Regulación.....            | 179 |
| Filtración Glomerular.....                              | 179 |
| Reabsorción y Secreción Tubular .....                   | 183 |
| Concentración y Dilución de la Orina .....              | 186 |
| Regulación Hormonal y Neural del Sistema Renal .....    | 188 |
| Sistema Renina-Angiotensina-Aldosterona (RAA).....      | 188 |
| Hormona Antidiurética (ADH o Vasopresina) .....         | 191 |
| Péptidos Natriuréticos (ANP y BNP) .....                | 192 |
| Control Neural.....                                     | 193 |
| Funciones Endocrinas del Riñón.....                     | 195 |
| Interacciones del Sistema Renal con Otros Sistemas..... | 197 |
| Relación con el Sistema Cardiovascular .....            | 197 |
| Relación con el Sistema Respiratorio .....              | 198 |
| Relación con el Sistema Endocrino .....                 | 199 |
| CAPITULO V .....                                        | 209 |
| Sistema Cardiovascular y Linfático .....                | 210 |
| Anatomía del Sistema Cardiovascular .....               | 212 |
| Componentes y Organización General .....                | 212 |
| Vasos Sanguíneos: Estructura Comparativa.....           | 216 |
| Composición y Función de la Sangre .....                | 218 |
| Hemostasia y Factores de Coagulación.....               | 223 |

|                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Factores de Coagulación: Clasificación y Funciones .....                         | 225 |
| Fisiología del Sistema Cardiovascular .....                                      | 226 |
| Ciclo Cardíaco y Contracción del Miocardio .....                                 | 226 |
| Circulación Sistémica y Pulmonar .....                                           | 229 |
| Gasto Cardíaco.....                                                              | 230 |
| Presión Arterial .....                                                           | 231 |
| Intercambio Capilar: Difusión, Filtración y Reabsorción .....                    | 233 |
| Contracción miocárdica y regulación hemodinámica .....                           | 239 |
| Fisiología del Sistema Linfático.....                                            | 241 |
| Organización General y Componentes .....                                         | 241 |
| Funciones Integradas del Sistema Linfático .....                                 | 245 |
| Interacciones del Sistema Cardiovascular y Linfático con Otros Sistemas<br>..... | 247 |
| Relación con el Sistema Respiratorio .....                                       | 248 |
| Relación con el Sistema Renal.....                                               | 249 |
| Relación con el Sistema Endocrino .....                                          | 249 |
| Relación con el Sistema Digestivo .....                                          | 250 |
| Relación con el Sistema Nervioso.....                                            | 251 |
| Relación con el Sistema Musculoesquelético .....                                 | 251 |
| Referencias Bibliográficas .....                                                 | 261 |

## **CAPITULO I**

Medio Interno, Homeostasis y Sistemas de Control de las Funciones Corporales

# **Medio Interno, Homeostasis y Sistemas de Control de las Funciones Corporales**

## **Introducción**

El adecuado funcionamiento del organismo animal depende de su capacidad para mantener un ambiente interno relativamente constante, a pesar de los múltiples cambios del entorno externo o las fluctuaciones generadas por su propia actividad fisiológica. A este entorno se lo denomina medio interno, concepto introducido en el siglo XIX por el fisiólogo francés Claude Bernard, quien postuló que “la constancia del medio interno es la condición fundamental para la vida libre” (Sieck, 2018).

Décadas más tarde, el fisiólogo estadounidense Walter Cannon formalizó este principio bajo el término homeostasis, definiéndola como un proceso dinámico mediante el cual los organismos regulan activamente sus funciones para mantener la estabilidad interna frente a perturbaciones (Sieck, 2018). Esta regulación no implica rigidez, sino una permanente capacidad de adaptación fisiológica que permite la vida en condiciones cambiantes.

La homeostasis es sostenida por una compleja red de sistemas de control fisiológico que actúan de forma sinérgica. Entre ellos destacan el sistema nervioso, con respuestas rápidas y localizadas; el sistema endocrino, encargado de ajustes más sostenidos a través de la liberación de hormonas; el sistema inmunológico, que protege y repara tejidos al mismo tiempo que modula procesos fisiológicos; y el sistema metabólico, responsable de garantizar la disponibilidad y el uso eficiente de los recursos energéticos (Hall & Hall, 2020).

Estos sistemas integran señales sensoriales, humorales y neuronales para controlar variables críticas como la temperatura corporal, el pH sanguíneo, la concentración de electrolitos, el volumen de líquidos, la presión arterial o los niveles de glucosa. A través de mecanismos de retroalimentación negativa y positiva, el organismo detecta desviaciones respecto a un valor de referencia (set point),

ejecuta respuestas compensatorias y, si es necesario, se adapta a nuevos estados de equilibrio funcional.

En el contexto de la medicina veterinaria, comprender estos principios no solo es esencial para interpretar la fisiología animal normal, sino también para diagnosticar y tratar múltiples patologías que representan fallos o alteraciones en la autorregulación del medio interno (Pérez, 2013).

Por ello, en este capítulo se revisan en profundidad los fundamentos del medio interno y la homeostasis, los principales mecanismos fisiológicos de regulación, y la forma en que los sistemas corporales interactúan para preservar el equilibrio vital. Se incluirán ejemplos aplicados y situaciones clínicas que ilustran la relevancia de estos conceptos en la práctica profesional veterinaria.

## **Objetivos**

- Definir el concepto de medio interno y explicar su importancia para la función celular.
- Describir la distribución de los compartimentos líquidos corporales (intracelular y extracelular) y su composición principal.
- Explicar el concepto de homeostasis y enumerar ejemplos de parámetros fisiológicos que se mantienen dentro de rangos normales.
- Diferenciar entre mecanismos de retroalimentación negativa y retroalimentación positiva, e identificar ejemplos de cada uno.

## **Preguntas de Enfoque**

1. ¿Qué se entiende por medio interno y por qué es crucial mantenerlo relativamente constante?
2. ¿Cómo define la fisiología el término homeostasis y cuáles son sus componentes fundamentales?

3. ¿De qué manera el organismo detecta los cambios en su medio interno y responde a ellos para restablecer el equilibrio?
4. ¿En qué consisten los mecanismos de retroalimentación negativa y positiva, y cómo contribuyen a la regulación de funciones vitales?
5. ¿Cómo interactúan distintos sistemas (nervioso, endocrino, respiratorio, renal, etc.) para preservar la homeostasis en un animal?
6. ¿Puede pensar en situaciones clínicas (ejemplo: deshidratación, hipotermia, shock) donde la homeostasis se vea comprometida? ¿Qué respuestas fisiológicas se activan en esos casos?

## **Medio Interno y Compartimentos de Líquidos Corporales**

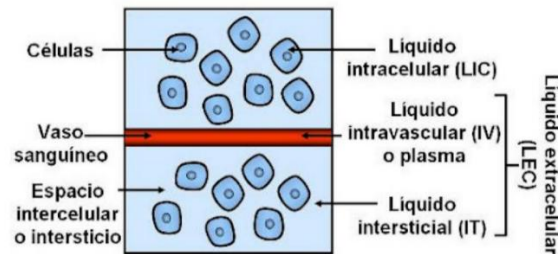
El medio interno es el entorno inmediato que rodea a las células del organismo y que proporciona las condiciones necesarias para su funcionamiento. Fue descrito por primera vez por Claude Bernard, quien subrayó que la constancia de este medio es esencial para la vida libre y autónoma (Libretti & Puckett, 2023).

Desde el punto de vista fisiológico, el medio interno está constituido principalmente por el líquido extracelular (LEC), el cual incluye al plasma sanguíneo y al líquido intersticial, que baña los tejidos. También se considera el líquido transcelular, una fracción funcionalmente importante que incluye el líquido cefalorraquídeo, sinovial, pleural, peritoneal y humor vítreo, entre otros, aunque representa un pequeño porcentaje del volumen total (Hall & Hall, 2020).

En un mamífero adulto sano, aproximadamente el 60% del peso corporal es agua, distribuida de la siguiente forma:

- **Líquido intracelular (LIC):** alrededor del 66% del agua corporal total. Se encuentra dentro de las células y es el sitio de reacciones metabólicas esenciales.
- **Líquido extracelular (LEC):** cerca del 33%, repartido en un 75% como líquido intersticial y un 25% como plasma sanguíneo.

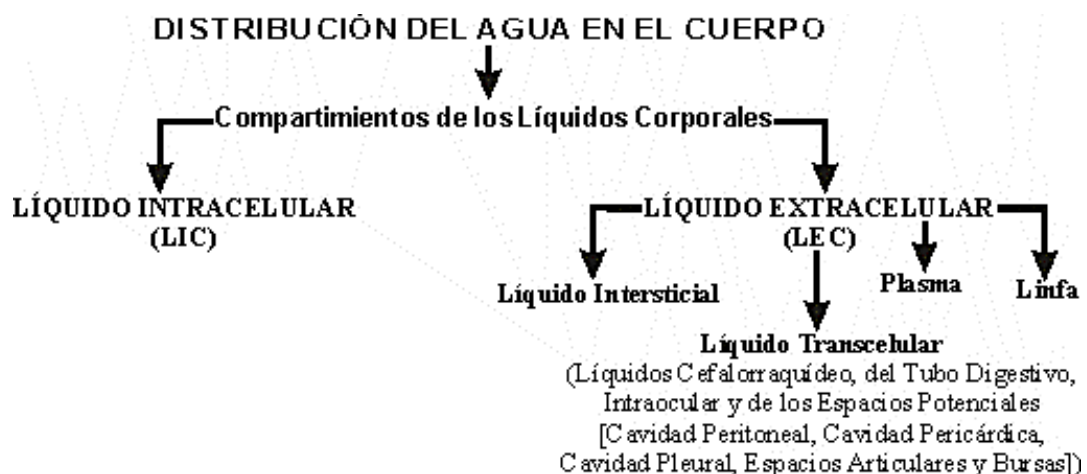
Para visualizar de manera más clara la distribución de los compartimentos líquidos descritos, la Figura 1 ilustra la organización del líquido intracelular, intersticial e intravascular, permitiendo relacionar su proporción relativa con las funciones fisiológicas que desempeñan en el organismo.



**Figura 1.** Líquidos corporales: intracelular, intersticial e intravascular

**Fuente:** Meses (2019)

Complementando esta información, la Figura 2 muestra una representación esquemática de la distribución del agua en el cuerpo, destacando la relación entre los distintos compartimentos y su conexión con el líquido transcelular. Esta visualización facilita comprender cómo el agua corporal se reparte y circula entre los espacios fisiológicos.



**Figura 2.** Distribución del agua en el cuerpo

**Fuente:** Hurtado et al. (2014)

Comprender la distribución de los líquidos corporales permite avanzar hacia el análisis de su composición química, la cual determina muchas de las funciones celulares esenciales y condiciona la necesidad de mecanismos precisos de regulación.

## **Composición y Función del Medio Interno**

El mantenimiento de la composición físico-química del medio interno es vital para que las células mantengan sus funciones básicas: excitabilidad, secreción, contracción, transporte activo, etc. Entre los parámetros que deben permanecer dentro de rangos fisiológicos estrictos se incluyen:

- **Temperatura corporal:** La mayoría de las enzimas animales funcionan de forma óptima cerca de los 38-39 °C en mamíferos. Variaciones fuera de este rango pueden alterar la estructura proteica y descompensar la homeostasis térmica (Cunningham & Klein, 2009).
- **pH de los líquidos corporales:** El pH sanguíneo debe mantenerse cercano a 7,4. La regulación se logra mediante sistemas tampón (bicarbonato, proteínas, fosfatos), ventilación pulmonar para eliminar CO<sub>2</sub> y mecanismos renales que controlan la excreción de protones y bicarbonato (Cunningham & Klein, 2009).
- **Concentración de electrolitos:** Iones como sodio (Na<sup>+</sup>), potasio (K<sup>+</sup>), cloruro (Cl<sup>-</sup>), calcio (Ca<sup>2+</sup>) y magnesio (Mg<sup>2+</sup>) son esenciales para la transmisión nerviosa, la contracción muscular, el equilibrio osmótico y el potencial de membrana.
- **Volumen y presión del LEC:** Su alteración puede generar hipovolemia o hiperhidratación, afectando la perfusión tisular y la función renal, cardiovascular y nerviosa.

Una vez caracterizados los componentes del medio interno, es importante comprender cómo las diferencias osmóticas entre compartimentos determinan el movimiento de agua y solutos, configurando un equilibrio dinámico fundamental para la vida.

## Diferencias Iónicas entre Compartimentos

Una característica fundamental del medio interno es la distribución desigual de electrolitos entre el líquido intracelular (LIC) y el líquido extracelular (LEC), mantenida activamente por mecanismos de transporte transmembranal (Hall & Hall, 2020).

Esta distribución diferencial no es casual: es esencial para múltiples funciones fisiológicas, incluyendo:

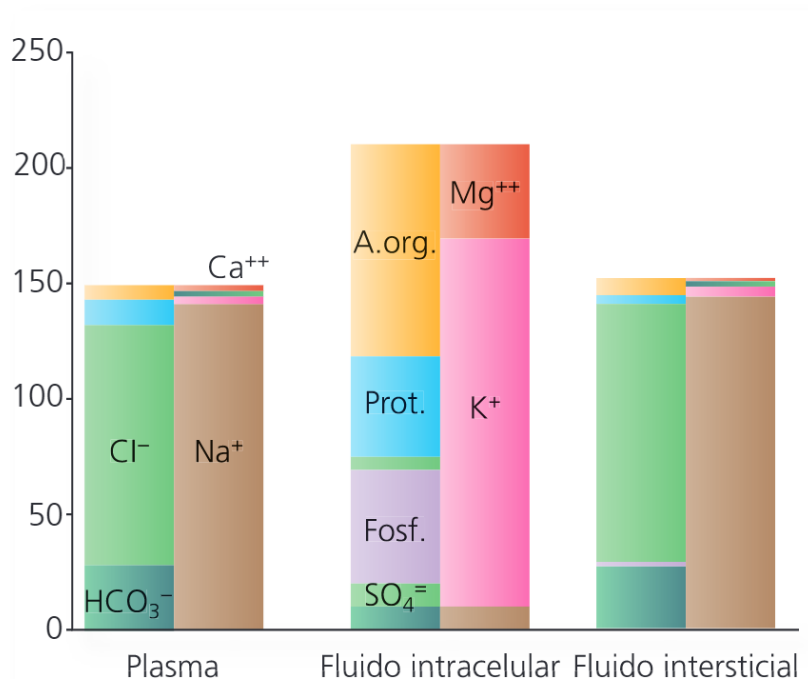
- La generación del potencial de membrana en reposo, crucial para la excitabilidad de neuronas y células musculares.
- La contracción muscular mediante flujos de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ).
- El transporte activo de solutos como glucosa y aminoácidos.
- El equilibrio osmótico entre compartimentos líquidos.

Entre las principales diferencias iónicas tenemos:

- El sodio ( $\text{Na}^+$ ) es el catión predominante en el LEC ( $\sim 140$  mM), mientras que en el LIC se mantiene bajo ( $\sim 10$ – $15$  mM).
- El potasio ( $\text{K}^+$ ) es alto en el LIC ( $\sim 140$  mM) y bajo en el LEC ( $\sim 4$ – $5$  mM).
- El cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) es el principal anión en el LEC ( $\sim 100$  mM), pero su concentración en el LIC es mucho menor.
- El calcio libre ( $\text{Ca}^{2+}$ ) es abundante en el LEC ( $\sim 1,2$  mM ionizado) pero extremadamente bajo en el LIC ( $\sim 0,0001$  mM), manteniéndose en concentraciones de nanomolar para evitar activaciones celulares espontáneas.

Para visualizar comparativamente estas diferencias en la distribución de iones entre los distintos compartimentos corporales, la Figura 3 sintetiza de manera gráfica cómo varían las concentraciones relativas de los solutos principales en el plasma, el líquido intersticial y el líquido intracelular. Esta representación facilita la

comprensión de los gradientes electroquímicos que sustentan procesos esenciales como la excitabilidad celular, el equilibrio osmótico y la transmisión nerviosa.



**Figura 3.** Comparación de la concentración relativa de solutos en los compartimentos líquidos corporales: plasma, líquido intersticial y líquido intracelular.

**Fuente:** Acosta (2015)

Complementando esta comparación visual, la Tabla 1 presenta los valores aproximados de concentración iónica en el líquido extracelular y en el líquido intracelular. Estos datos cuantitativos permiten apreciar con mayor precisión los gradientes que regulan fenómenos como la osmolaridad, el potencial de membrana y el movimiento de solutos entre compartimentos, proporcionando una base numérica indispensable para el análisis fisiológico.

**Tabla 1.** Composición iónica típica del líquido extracelular vs. intracelular (en mmol/L)

| Ion                             | Extracelular (≈ mM) | Intracelular (≈ mM) |
|---------------------------------|---------------------|---------------------|
| Na <sup>+</sup> (Sodio)         | 140                 | 10-15               |
| K <sup>+</sup> (Potasio)        | 4-5                 | 140                 |
| Ca <sup>2+</sup> (Calcio total) | 2.4 (ionizado ~1.2) | 0.0001              |
| Cl <sup>-</sup> (Cloruro)       | 100                 | 5-10                |

**Fuente:** Adaptado de Guzmán & Serrano (2024)

Para comprender cómo este equilibrio se mantiene dinámicamente, es necesario explorar los mecanismos de regulación que permiten que cada variable fisiológica permanezca dentro de rangos estrechos.

**Mecanismos de mantenimiento de gradientes iónicos**

La bomba sodio-potasio ATPasa (Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup>-ATPasa) es el principal sistema encargado de mantener esta distribución:

- Expulsa 3 Na<sup>+</sup> al exterior celular.
- Introduce 2 K<sup>+</sup> al interior celular.
- Gasta energía en forma de ATP.

Además, canales específicos para Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> y transportadores secundarios contribuyen a modular los gradientes iónicos en diferentes tejidos (Sjaastad et al., 2020).

Es importante mencionar que la diferencia de cargas eléctricas entre el interior y exterior celular genera el potencial de membrana en reposo (~-70 mV en neuronas), base para la excitación nerviosa y muscular.

## Consecuencias de la alteración de los gradientes

Alteraciones de estos gradientes pueden tener consecuencias fisiopatológicas graves:

- **Hiperkalemia** (aumento de  $K^+$  en el plasma): disminuye el potencial de membrana de reposo, favoreciendo despolarización espontánea → riesgo de arritmias cardíacas.
- **Hiponatremia**: disminuye la osmolaridad plasmática, favoreciendo el edema celular, incluyendo edema cerebral.
- **Hipocalcemia**: disminuye el umbral de excitabilidad, aumentando el riesgo de tetania muscular.

## Regulación del Volumen de Líquidos

La homeostasis hídrica es esencial para la vida celular y depende de mecanismos fisiológicos que controlan el volumen y la composición de los líquidos corporales. Estos mecanismos aseguran que el intercambio de nutrientes, el transporte de gases, la función enzimática y la señalización eléctrica ocurran bajo condiciones óptimas (Hall & Hall, 2020).

## Mecanismos de detección

La regulación comienza con la detección de cambios:

- **Osmorreceptores** hipotalámicos: Sensibles a pequeñas variaciones de osmolaridad plasmática. Detectan aumentos en la concentración de solutos.
- **Barorreceptores** de alta presión (en seno carotídeo y arco aórtico): Detectan cambios en presión arterial.
- **Receptores de volumen** de baja presión (en aurículas y vasos pulmonares): Detectan variaciones en el volumen circulante efectivo.

Estos receptores envían señales al sistema nervioso central para iniciar respuestas de corrección (Hall & Hall, 2020).

## **Principales sistemas hormonales involucrados**

### **1. Vasopresina (ADH)**

- Secretada por la neurohipófisis en respuesta a aumento de osmolaridad o disminución del volumen plasmático.
- Aumenta la reabsorción de agua en los túbulos colectores renales, concentrando la orina y conservando agua.

### **2. Sistema Renina-Angiotensina-Aldosterona (SRAA)**

- Activado por hipovolemia o hipotensión.
- Renina (liberada por las células yuxtaglomerulares) cataliza la conversión de angiotensinógeno en angiotensina I, luego convertida en angiotensina II (vasoconstrictora).
- Angiotensina II estimula la secreción de aldosterona por la corteza suprarrenal.
- Aldosterona promueve la reabsorción de sodio (y agua secundaria) en el túbulo distal y colector.

### **3. Péptidos Natriuréticos (ANP y BNP)**

- Liberados por las aurículas (ANP) o ventrículos (BNP) ante aumento de volumen.
- Promueven la excreción de sodio y agua (natriuresis y diuresis), reduciendo el volumen plasmático y la presión arterial.

### **4. Sed y Comportamiento de Ingesta de Agua**

- Activados por aumento de la osmolaridad o disminución del volumen.
- Controlados por núcleos hipotalámicos especializados.

## **Respuesta Integrada**

Cuando el organismo detecta deshidratación o hipovolemia:

- Se incrementa la liberación de ADH → retención de agua en riñones.

- Se activa el SRAA → retención de sodio y agua, vasoconstricción.
- Se estimula la sed → aumento de ingesta hídrica.

Cuando el organismo detecta sobrecarga de volumen:

- Se reduce la secreción de ADH y aldosterona.
- Se liberan péptidos natriuréticos → eliminación de sodio y agua.
- Se suprime la sed.

La regulación del volumen corporal es solo uno de los múltiples procesos que actúan simultáneamente para mantener condiciones fisiológicas estables. Este conjunto de mecanismos da origen al concepto de homeostasis y su carácter dinámico.

### **Homeostasis: Equilibrio Dinámico del Medio Interno**

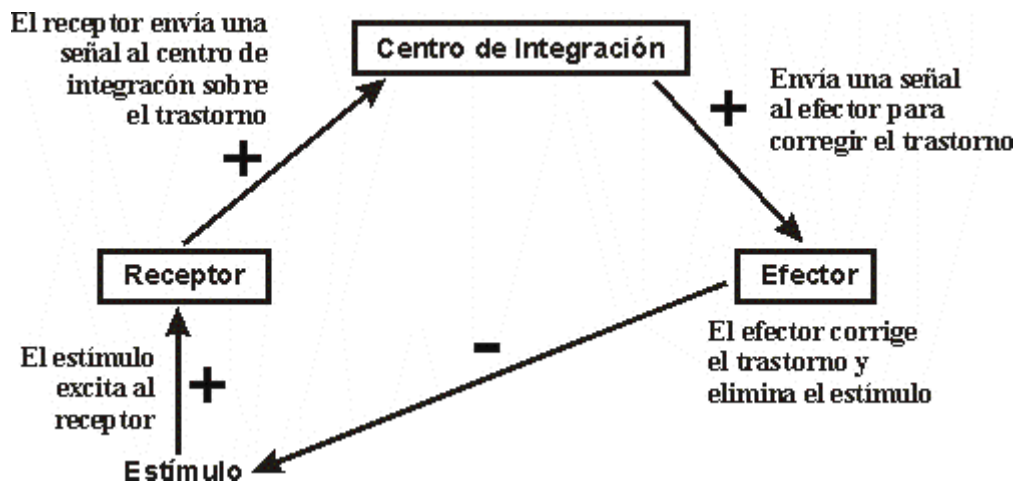
La homeostasis es la capacidad del organismo para mantener estables las condiciones internas (temperatura, pH, osmolaridad, concentración de electrolitos, glucosa, presión arterial, entre otras), a pesar de fluctuaciones ambientales o cambios internos (Sieck, 2018; Hall & Hall, 2020). Este equilibrio es dinámico y no estático; las variables fisiológicas oscilan continuamente alrededor de valores óptimos o puntos de ajuste (set point), regulándose mediante ajustes permanentes (Guzmán & Serrano, 2024).

La regulación homeostática implica tres componentes básicos (Pérez, 2013):

1. **Receptores (sensores):** Detectan cambios en variables específicas.
2. **Centro integrador:** Evalúa la información recibida de los sensores, la compara con el valor de referencia y determina una respuesta apropiada.
3. **Efectores:** Ejecutan las acciones necesarias para restaurar el equilibrio.

Para representar de forma esquemática cómo interactúan estos tres componentes fundamentales, la Figura 4 muestra la estructura funcional básica de un sistema homeostático. En ella se aprecia la secuencia estímulo-receptor-centro integrador-efector, que permite comprender visualmente cómo se detectan los

cambios en el medio interno, cómo se compara la información con el valor de referencia y cómo se ejecuta la respuesta correctiva destinada a restablecer el equilibrio fisiológico.



**Figura 4.** Componentes básicos de un sistema homeostático: receptor, centro integrador y efector

**Fuente:** Agüero (2021)

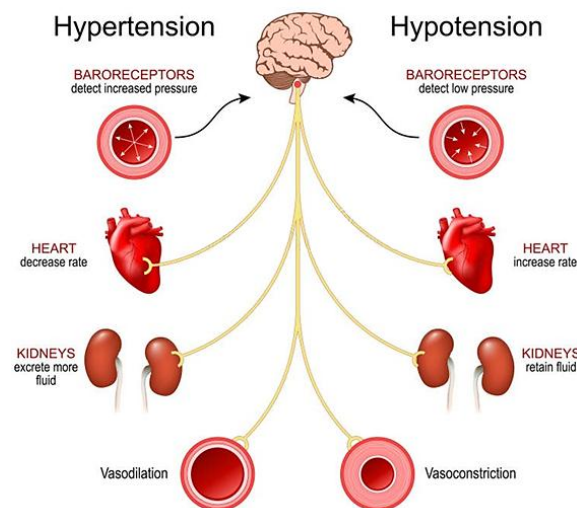
La comprensión de la homeostasis no se limita a sus definiciones teóricas. Para consolidar el aprendizaje, es necesario analizar cómo estos mecanismos se manifiestan en situaciones reales y en procesos fisiológicos concretos. A continuación, se presentan ejemplos aplicados que ilustran cómo los sistemas de control mantienen el equilibrio interno frente a diversos desafíos, permitiendo al organismo preservar su estabilidad funcional.

### Ejemplos Prácticos de Homeostasis

- **Regulación del pH sanguíneo:** El pH debe mantenerse en torno a 7.4. La estabilidad se asegura mediante sistemas tampón (principalmente bicarbonato), control respiratorio (eliminación pulmonar de  $\text{CO}_2$ ) y regulación renal (excreción de protones y reabsorción de bicarbonato) (Cunningham & Klein, 2009).

- **Equilibrio hidroelectrolítico:** Hormonas como la vasopresina (ADH) y aldosterona regulan la reabsorción renal de agua y electrolitos (principalmente sodio y potasio), ajustando continuamente la osmolaridad y volumen de los compartimentos líquidos corporales (Pérez, 2013).
- **Regulación de la presión arterial:** Los barorreceptores arteriales detectan cambios en la presión y envían señales al centro cardiovascular del bulbo raquídeo. Ante hipotensión, se activan mecanismos como aumento de frecuencia cardíaca y vasoconstricción periférica; ante hipertensión ocurre lo opuesto (Hall & Hall, 2020).

Para complementar esta explicación, la Figura 5 muestra de manera esquemática cómo los barorreceptores y los órganos efectores participan en el control inmediato de la presión arterial. A través de esta representación visual es posible apreciar cómo los cambios en la presión desencadenan respuestas rápidas mediadas por el sistema nervioso autónomo, permitiendo entender con mayor claridad la dinámica entre vasoconstricción, vasodilatación y ajustes cardiovasculares necesarios para mantener la estabilidad hemodinámica.



**Figura 5.** Regulación homeostática de la presión arterial

**Fuente:** Designua (2024)

La estabilidad fisiológica depende de la acción combinada de diversos sistemas, cada uno con funciones específicas pero interdependientes. Esta integración permite respuestas coordinadas ante variaciones en el medio interno o en el entorno.

### **Sistemas Integrados para el Control Homeostático**

La homeostasis no depende de mecanismos aislados, sino que implica la interacción coordinada de múltiples sistemas fisiológicos:

#### **Sistema Nervioso: Control Rápido y Preciso**

Detecta rápidamente cambios en el medio interno, generando respuestas inmediatas mediante impulsos eléctricos y químicos. Por ejemplo:

- **Termorregulación:** Ante aumento de temperatura, el hipotálamo activa sudoración y vasodilatación cutánea. Ante disminución, genera vasoconstricción y temblor muscular (Cunningham & Klein, 2009).
- **Respuesta simpática (lucha o huida):** En estrés agudo, se libera adrenalina/noradrenalina, aumentando frecuencia cardíaca, ventilación y disponibilidad de glucosa.

#### **Sistema Endocrino: Control Lento pero Sostenido**

Complementando la regulación nerviosa, el organismo dispone de mecanismos hormonales que actúan de forma más lenta, pero sostenida y coordinada con el sistema nervioso.

El Sistema Endocrino Produce respuestas a mediano y largo plazo mediante hormonas que actúan en órganos diana específicos. Ejemplos relevantes incluyen:

- **Eje hipotálamo-hipófisis-adrenal (HHA):** Frente a estrés prolongado, se libera CRH → ACTH → cortisol, movilizando reservas energéticas y modulando la respuesta inmunitaria (Guzmán & Serrano, 2024).

- **Regulación glucémica:** La insulina y glucagón mantienen niveles adecuados de glucosa sanguínea.

### **Sistema Inmunológico: Defensa y Regulación Inter sistémica**

Además de defender al organismo de patógenos, participa activamente en la regulación homeostática mediante citoquinas (como IL-6 o TNF- $\alpha$ ) que influyen sobre la función endocrina y nerviosa. La inflamación controlada es necesaria para reparación tisular, pero una inflamación crónica puede alterar la homeostasis metabólica, causando resistencia a la insulina (Pérez, 2013).

### **Sistema Metabólico: Mantenimiento Energético**

Garantiza la disponibilidad energética y la homeostasis de nutrientes mediante regulación hormonal (insulina, glucagón, leptina, ghrelina). La conversión de glucosa y grasas en ATP en hígado y músculo es crucial para mantener la energía celular en diferentes condiciones fisiológicas (Arias, 2012).

Para integrar los conceptos desarrollados en los apartados anteriores, la Tabla 2 resume de forma comparativa cómo distintos sistemas fisiológicos participan en el mantenimiento de la homeostasis. Esta síntesis permite visualizar, de manera clara y ordenada, la función principal de cada sistema, los mecanismos mediante los cuales actúan y ejemplos clínicos que ilustran su relevancia en situaciones reales. Su inclusión facilita una comprensión global del trabajo coordinado entre sistemas nervioso, endocrino, inmunológico y metabólico en la regulación del medio interno.

**Tabla 2.** Ejemplos integrativos de homeostasis.

| Sistema             | Función Principal | Mecanismo de Acción | Ejemplo Clínico                   |           |
|---------------------|-------------------|---------------------|-----------------------------------|-----------|
| <b>Nervioso</b>     | Respuesta rápida  | Impulsos nerviosos  | Regulación térmica                |           |
| <b>Endocrino</b>    | Acción sostenida  | Hormonas            | Control (insulina)                | glucémico |
| <b>Inmunológico</b> | Defensa           | Citoquinas          | Inflamación controlada            | aguda     |
| <b>Metabólico</b>   | Energía celular   | ATP, glucosa        | Movilización de reservas en ayuno |           |

**Fuente:** Adaptado de Arias (2012)

## Mecanismos de Control y Retroalimentación

La regulación del medio interno se fundamenta en la capacidad del organismo para detectar desviaciones en variables críticas y activar mecanismos que restablecen el equilibrio (Boeta et al., 2018). Estos mecanismos se agrupan en dos categorías principales: la retroalimentación negativa y la retroalimentación positiva.

### a) Retroalimentación Negativa

La retroalimentación negativa es el mecanismo más común y esencial para mantener la homeostasis. Consiste en respuestas que se activan ante un cambio en una variable fisiológica, con el objetivo de contrarrestar dicho cambio y devolver la variable a su valor de referencia o set point. Este sistema se caracteriza por su capacidad de autorregulación, ya que una vez que la variable vuelve a su rango normal, el estímulo que activó la respuesta disminuye, y los mecanismos se desactivan (Hall & Hall, 2021).

### Mecanismo de Acción:

1. **Detección:** Los receptores sensoriales monitorean continuamente las condiciones internas. Por ejemplo, los termorreceptores detectan cambios en la temperatura corporal.

2. **Integración:** La información es procesada en centros de control, como el hipotálamo en el caso de la regulación térmica, donde se evalúa la magnitud del cambio.
3. **Respuesta Efectora:** Con base en la evaluación, se activan mecanismos efectores para contrarrestar el cambio. En el ejemplo de la termorregulación, si la temperatura aumenta, se activan respuestas como la sudoración y la vasodilatación, las cuales facilitan la disipación del calor.
4. **Desactivación:** Una vez que la variable alcanza su valor normal, la señal que originó la respuesta se reduce o elimina, deteniendo el mecanismo efector.

### Ejemplos:

- **Regulación de la temperatura corporal:** Si la temperatura corporal se eleva por encima del rango óptimo, los termorreceptores ubicados en la piel y el hipotálamo detectan esta alteración. En respuesta, se activan mecanismos como la sudoración y la vasodilatación, lo que facilita la disipación del calor a través de la evaporación y el aumento del flujo sanguíneo en la piel. Una vez que la temperatura regresa a su valor normal, estos procesos se regulan o cesan, evitando una sobrecorrección que pueda generar un enfriamiento excesivo.
- **Regulación de la presión arterial:** Si la presión arterial aumenta por encima del rango normal, los barorreceptores ubicados en las arterias detectan este cambio y envían señales al cerebro. En respuesta, se activan mecanismos como la vasodilatación y la reducción de la frecuencia cardíaca, lo que disminuye la presión arterial. Una vez que la presión vuelve a su nivel normal, estos procesos se modulan o cesan, evitando una caída excesiva de la presión.
- **Control de la osmolaridad sanguínea:** Si la concentración de solutos en la sangre aumenta debido a la deshidratación, el hipotálamo detecta este cambio y estimula la liberación de hormona antidiurética (ADH), lo que promueve la reabsorción de agua en los riñones. Como resultado, la orina se

concentra y se reduce la pérdida de agua. Cuando la osmolaridad vuelve a su nivel normal, la secreción de ADH disminuye, permitiendo que el equilibrio hídrico se mantenga sin alteraciones.

Luego de analizar los mecanismos estabilizadores, resulta útil contrastarlos con aquellos que amplifican una respuesta, característicos de la retroalimentación positiva, que funcionan en situaciones fisiológicas muy específicas.

### **b) Retroalimentación Positiva**

A diferencia de la retroalimentación negativa, la retroalimentación positiva amplifica el cambio inicial, generando una respuesta que se retroalimenta para aumentar su propia magnitud. Este mecanismo se utiliza en situaciones específicas donde es necesario un cambio rápido y decisivo. Sin embargo, su acción no es común en el mantenimiento de la homeostasis general, ya que, de no regularse, puede llevar a respuestas descontroladas (Hall & Hall, 2021).

#### **Mecanismo de Acción:**

1. **Amplificación:** Una vez que se detecta un estímulo, la respuesta inducida se refuerza a sí misma.
2. **Limitación Temporal:** Este mecanismo suele estar asociado a procesos transitorios y limitados en el tiempo, ya que el aumento continuo de la respuesta podría resultar perjudicial.
3. **Finalización del Proceso:** Al cumplirse la función específica para la cual se activó, otros mecanismos intervendrán para detener la retroalimentación positiva y restablecer el equilibrio.

#### **Ejemplos:**

- **Coagulación sanguínea:** Cuando se produce una lesión en un vaso sanguíneo, se activan factores de coagulación que desencadenan una reacción en cadena, promoviendo la formación de un coágulo. A medida que

se activan más factores, la respuesta se intensifica, acelerando el proceso hasta que la hemorragia se detiene. Una vez que el vaso sanguíneo está sellado, la cascada de coagulación se detiene, evitando una formación excesiva de coágulos.

- **Contracciones uterinas durante el parto:** Durante el trabajo de parto, la presión del feto sobre el cuello uterino estimula la liberación de oxitocina por la hipófisis. Esta hormona intensifica las contracciones uterinas, lo que a su vez aumenta la presión sobre el cuello uterino, promoviendo la liberación de más oxitocina. Este ciclo continúa hasta que el feto es expulsado, momento en el cual la estimulación cesa y las contracciones disminuyen.
- **Lactancia materna:** Cuando un recién nacido succiona el pezón, se envían señales al hipotálamo, que estimula la secreción de oxitocina. Esta hormona provoca la eyección de leche de las glándulas mamarias, lo que incentiva al bebé a seguir succionando. Cuanto más se alimenta el bebé, más oxitocina se libera y mayor es la producción de leche. Una vez que el bebé deja de succionar, la estimulación cesa y la liberación de oxitocina disminuye.

A continuación, en la Tabla 3, se presenta una comparación entre los mecanismos de retroalimentación negativa y positiva, destacando sus diferencias y ejemplos fisiológicos. Esta tabla resume los aspectos clave de estos procesos para una mejor comprensión de su papel en la homeostasis.

**Tabla 3.** Comparación de Retroalimentación Negativa y Positiva en la Homeostasis

| Aspecto                         | Retroalimentación Negativa                                                  | Retroalimentación Positiva                                                                              |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Definición</b>               | Mecanismo que revierte cambios para mantener el equilibrio.                 | Mecanismo que amplifica una respuesta hasta que se alcanza un objetivo.                                 |
| <b>Acción</b>                   | Contrarresta el estímulo inicial.                                           | Refuerza el estímulo inicial.                                                                           |
| <b>Ejemplo Fisiológico</b>      | Regulación de la temperatura corporal mediante sudoración y vasodilatación. | Coagulación sanguínea, donde la activación de factores de coagulación acelera la formación del coágulo. |
| <b>Finalización del proceso</b> | Se desactiva una vez que la variable vuelve a su valor normal.              | Se detiene cuando se alcanza el resultado esperado (como el parto o la lactancia).                      |

**Fuente:** Adaptado de Reece (2015)

### Integración y Sinergia Fisiológica

Los mecanismos descritos no actúan de manera aislada; al contrario, se interrelacionan formando redes de control altamente coordinadas que permiten que el organismo responda eficazmente a desafíos internos y externos.

Según Lal et al. (2022), los sistemas corporales no actúan aisladamente; existe una integración dinámica y constante. Por ejemplo, durante el ejercicio en un caballo:

- El sistema muscular demanda más  $O_2$  y produce calor y metabolitos ácidos.
- El sistema cardiovascular y respiratorio aumentan flujo sanguíneo y ventilación para satisfacer esta demanda.
- El sistema endocrino libera adrenalina y cortisol movilizand o energía almacenada.
- El sistema nervioso coordina respuestas inmediatas y anticipatorias mediante reflejos musculares y centros del bulbo raquídeo.

Esta integración asegura una respuesta global eficiente para mantener la homeostasis (Brejov, 2014).

El organismo no depende de sistemas aislados para mantener la homeostasis, sino que sus respuestas están profundamente interconectadas, permitiendo una acción integrada y coordinada ante cualquier alteración en el medio interno (Lal et al., 2022). Esta integración o "proyección" sistémica se basa en varios mecanismos interrelacionados:

### **a) Comunicación Intersistémica**

La interacción entre los distintos sistemas se da a través de una red compleja de mensajeros químicos que facilitan la comunicación entre células y órganos (Boeta et al., 2018). Entre estos mensajeros se encuentran:

- **Neurotransmisores:** Permiten la transmisión de señales eléctricas a lo largo del sistema nervioso, coordinando respuestas rápidas.
- **Hormonas:** Liberadas por el sistema endocrino, actúan a mediano y largo plazo modulando funciones específicas en células y tejidos.
- **Citoquinas:** Producidas por el sistema inmunológico, estas moléculas regulan tanto la respuesta inflamatoria como la comunicación con otros sistemas, como el endocrino y el nervioso.

Esta comunicación intersistémica garantiza que las señales generadas en un sistema se traduzcan en respuestas integradas y adaptativas en todo el organismo.

### **b) Sinergia entre Respuestas**

La coordinación entre los sistemas permite que las respuestas no sean simplemente la suma de acciones aisladas, sino que se potencien entre sí, generando una respuesta más eficiente (Brejov, 2014). Por ejemplo, en una situación de estrés:

1. El sistema nervioso activa el eje hipotálamo-hipófisis-adrenal (HHA), desencadenando una respuesta rápida que prepara al organismo para enfrentar el estímulo.
2. Esta activación provoca la liberación de cortisol, una hormona que no solo modula la respuesta hormonal, sino que también influye en la función inmunitaria y en la regulación del metabolismo.

3. La sinergia entre estos sistemas permite movilizar recursos energéticos, ajustar procesos metabólicos y coordinar mecanismos de defensa, proporcionando una respuesta integral y adaptativa.

### **c) Adaptación a Largo Plazo**

La exposición continua a ciertos estímulos ambientales o internos puede desencadenar procesos de adaptación que modifican la actividad y sensibilidad de los sistemas de control (Reece, 2015).

- **Ajustes Hormonales:** La exposición prolongada a un estímulo, como el estrés o cambios en la temperatura, puede alterar los niveles basales de ciertas hormonas, permitiendo una adaptación que optimiza la respuesta del organismo.
- **Plasticidad de Receptores:** Con el tiempo, los receptores celulares pueden modificar su sensibilidad, ya sea aumentando o disminuyendo su respuesta a determinados mensajeros químicos. Esto es crucial para evitar respuestas excesivas o insuficientes ante estímulos recurrentes.
- **Reequilibrio del Medio Interno:** La adaptación a largo plazo implica un reajuste dinámico que permite al organismo mantener un nuevo equilibrio, incluso en presencia de condiciones ambientales cambiantes o estresantes.

## Resumen

El medio interno es el entorno en el que se desarrollan todas las funciones celulares y, por lo tanto, su estabilidad es fundamental para la vida. Factores como la temperatura, el pH, el balance de líquidos y la concentración de electrolitos deben mantenerse dentro de rangos estrechos para garantizar la actividad enzimática, la transmisión nerviosa y el metabolismo celular. Esta estabilidad se logra mediante mecanismos de autorregulación, agrupados bajo el concepto de homeostasis.

La homeostasis es un proceso dinámico que permite al organismo mantener el equilibrio de su medio interno, a pesar de las variaciones externas. Para ello, intervienen sistemas de control altamente especializados que trabajan en conjunto para detectar y corregir cualquier alteración. El sistema nervioso regula respuestas rápidas mediante señales eléctricas, mientras que el sistema endocrino modula procesos a mediano y largo plazo mediante la liberación de hormonas. A su vez, el sistema inmunológico protege contra agresiones externas y participa en la reparación tisular, y el sistema metabólico ajusta la producción y utilización de energía según las demandas del organismo.

Los mecanismos de retroalimentación negativa y positiva garantizan la regulación homeostática. La retroalimentación negativa es el mecanismo predominante, contrarrestando desviaciones para restablecer el equilibrio, como ocurre en la regulación de la temperatura corporal y la presión arterial. En contraste, la retroalimentación positiva amplifica respuestas específicas hasta que se alcanza un objetivo fisiológico, como en el parto, la lactancia y la coagulación sanguínea.

Además, la interacción entre los diferentes sistemas fisiológicos permite una respuesta integrada ante desafíos internos y externos. Esta coordinación intersistémica no solo mantiene la homeostasis en condiciones normales, sino que también permite la adaptación a largo plazo a factores ambientales o fisiológicos cambiantes.

El conocimiento de estos procesos es fundamental en la práctica clínica veterinaria, ya que muchas patologías surgen por fallos en los mecanismos homeostáticos. La comprensión de estos principios permite interpretar mejor las respuestas fisiológicas del organismo y diseñar estrategias de intervención eficaces para preservar la salud animal.

En síntesis, la homeostasis depende del funcionamiento coordinado de múltiples sistemas fisiológicos que actúan para mantener estables las variables internas del organismo. Sin embargo, la regulación no sería posible sin un aporte constante de nutrientes y energía que permitan sostener los procesos metabólicos. Este requerimiento conecta directamente los principios de homeostasis con el papel fundamental del sistema digestivo como puerta de entrada del material necesario para mantener la vida.

## Actividades

### 1. Definición y Concepto:

- a) ¿Qué se entiende por "medio interno" y por qué es fundamental para la supervivencia del organismo?

---

---

---

- b) Describe en tus propias palabras la diferencia entre retroalimentación negativa y retroalimentación positiva, e ilustra cada una con un ejemplo práctico.

---

---

---

---

---

- c) ¿Qué papel juegan la temperatura corporal, el pH y la concentración de electrolitos en el mantenimiento de la homeostasis?

---

---

---

---

## 2. Integración de Sistemas:

- a) ¿Cómo colaboran el sistema nervioso y el endocrino para mantener la homeostasis en situaciones de estrés? Menciona los mecanismos implicados.

---

---

---

- b) Describe un escenario en el que una alteración en el medio interno (por ejemplo, deshidratación o hipertermia) desencadene una respuesta coordinada de varios sistemas, explicando cómo se integran dichas respuestas.

---

---

---

- c) Explica cómo el sistema inmunológico y el metabólico interactúan para ajustar la respuesta del organismo ante una infección o una agresión externa.

---

---

---

- d) ¿Qué papel desempeña el hipotálamo en la integración de señales sensoriales y en la coordinación de respuestas homeostáticas?

---

---

---

### 3. **Aplicación Clínica:**

- a) Considerando el caso clínico de un equino expuesto a altas temperaturas, identifica los mecanismos homeostáticos que se activan y propone posibles intervenciones para restablecer el equilibrio interno.

---

---

---

- b) ¿Por qué algunos animales, como los perros, muestran mecanismos de disipación de calor diferentes a los de los caballos?

---

---

---

- c) ¿Qué medidas de intervención se podrían implementar en un animal que presente hipoglucemia debido a una alteración en la función pancreática?

---

---

- d) Explica cómo la disfunción de la retroalimentación negativa puede contribuir al desarrollo de condiciones crónicas, proporcionando un ejemplo clínico.

---

---

---

---

This image shows a blank sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

## Taller

1. Organiza un debate o sesión de resolución de problemas en grupos para discutir diferentes escenarios de alteración del medio interno. Elabora mapas conceptuales que integren las respuestas coordinadas de los distintos sistemas implicados en la homeostasis.
2. Diseña un plan de intervención clínica para un paciente veterinario que sufra de deshidratación severa y alteraciones electrolíticas, justificando las estrategias terapéuticas basadas en los mecanismos homeostáticos estudiados.
3. Realiza un análisis crítico de un caso en el que la regulación del pH sanguíneo esté comprometida. ¿Qué estrategias terapéuticas podrían aplicarse para restaurar el equilibrio ácido-base?

## Glosario

1. **Medio Interno:** Entorno inmediato que rodea a las células del organismo y que proporciona las condiciones necesarias para su funcionamiento. Conjunto de condiciones físicas y químicas que se mantienen constantes en el interior del organismo, proporcionando un ambiente óptimo para el funcionamiento celular. Incluye parámetros como temperatura, pH, concentración de iones y la distribución de líquidos (intracelular y extracelular).
2. **Homeostasis:** Proceso dinámico mediante el cual se mantiene la *estabilidad* del medio interno a pesar de las variaciones externas e internas. Se logra a través de mecanismos de control y retroalimentación que aseguran el funcionamiento adecuado de los procesos vitales.
3. **Retroalimentación Negativa:** Mecanismo de control en el que una desviación de una variable fisiológica provoca una respuesta que

contrarresta el cambio, devolviendo la variable a su valor normal. Ejemplo: la sudoración ante el aumento de la temperatura corporal.

4. **Retroalimentación Positiva:** Mecanismo en el cual una respuesta inicial se amplifica mediante una cascada de eventos, incrementando la magnitud del cambio. Se utiliza en procesos específicos y transitorios, como la coagulación sanguínea.
5. **Sistema Endocrino:** Conjunto de glándulas que producen y liberan hormonas, las cuales actúan como mensajeros químicos para regular funciones corporales a mediano y largo plazo. Está estrechamente relacionado con el sistema nervioso a través de ejes hormonales, como por ejemplo el hipotálamo-hipofisiario-adrenal, entre otros.
6. **Sistema Inmunológico:** Conjunto de células, tejidos y órganos que protegen al organismo contra infecciones y participan en la reparación y mantenimiento tisular. Además de su función defensiva, sus mediadores (citoquinas) influyen en otros sistemas para mantener la homeostasis.
7. **Sistema Metabólico:** Red de procesos bioquímicos y fisiológicos encargados del intercambio de nutrientes, la conversión de energía y la regulación de metabolitos. Este sistema garantiza que las células dispongan de la energía y los recursos necesarios para su funcionamiento.
8. **Líquido Intracelular (LIC):** Agua y solutos presentes dentro de las células, representando aproximadamente dos tercios del total de agua corporal. Es el sitio donde se llevan a cabo las reacciones metabólicas esenciales.
9. **Líquido Extracelular (LEC):** Agua y solutos que se encuentran fuera de las células, incluyendo el plasma sanguíneo y el líquido intersticial. Juega un papel crucial en el transporte de nutrientes y desechos, y en la comunicación entre células.
10. **Osmosis:** Movimiento pasivo de agua a través de una membrana semipermeable, desde una región de menor concentración de solutos a una de mayor concentración, contribuyendo al equilibrio entre los compartimentos líquidos.

11. **pH (Potencial de Hidrógeno):** Medida de la acidez o alcalinidad de un líquido. En el organismo, el pH debe mantenerse dentro de rangos muy específicos (por ejemplo, el pH sanguíneo cercano a 7,4) para asegurar el correcto funcionamiento de las enzimas y estructuras celulares.
12. **Electrolitos:** Iones disueltos en los líquidos corporales, como sodio, potasio, calcio, magnesio y cloro, que son fundamentales para procesos como la transmisión nerviosa, la contracción muscular y el equilibrio osmótico.
13. **Termorreceptores:** Sensores especializados presentes en la piel y en regiones del cerebro (como el hipotálamo) que detectan cambios en la temperatura y envían información para iniciar respuestas termorreguladoras.
14. **Hipotálamo:** Región del cerebro que actúa como centro de control para diversas funciones homeostáticas, integrando señales sensoriales y coordinando respuestas a través del sistema nervioso y endocrino.
15. **Eje Hipotálamo-Hipófisis-Adrenal (HHA):** Ruta de comunicación entre el hipotálamo, la hipófisis y las glándulas suprarrenales que regula la respuesta al estrés mediante la liberación de hormonas como la CRH, ACTH y cortisol.
16. **Cortisol:** Hormona liberada por las glándulas suprarrenales en respuesta al estrés, que moviliza reservas energéticas y modula la respuesta inflamatoria, contribuyendo a la adaptación del organismo ante situaciones adversas.
17. **Vasopresina (ADH/Hormona Antidiurética):** Hormona que regula la retención de agua en los riñones, ayudando a mantener el volumen plasmático y la presión arterial en condiciones de deshidratación o estrés.
18. **Péptidos Natriuréticos:** Hormonas peptídicas que facilitan la excreción de sodio y agua, reduciendo el volumen plasmático cuando es excesivo, y colaboran en el control de la presión arterial.
19. **Citoquinas:** Moléculas mensajeras producidas por células del sistema inmunológico que regulan la respuesta inflamatoria y facilitan la comunicación entre sistemas, influyendo en la función homeostática.

20. **Sistema Tampón:** Conjunto de mecanismos (incluyendo el bicarbonato, fosfatos y proteínas) que ayudan a mantener el pH de los líquidos corporales dentro de un rango óptimo, neutralizando ácidos y bases.

## **CAPITULO II**

Sistema Digestivo

## **Sistema Digestivo**

Continuando con la lógica fisiológica presentada en el Capítulo I, el sistema digestivo constituye el punto de partida del equilibrio energético y nutricional del organismo. A través de sus procesos mecánicos, enzimáticos y de absorción, este sistema proporciona las moléculas que permitirán a los demás órganos ejecutar sus funciones y sostener la homeostasis. Comprender su funcionamiento es esencial para interpretar la fisiología comparada y muchas manifestaciones clínicas frecuentes en la medicina veterinaria.

### **Introducción**

El sistema digestivo constituye uno de los pilares fundamentales de la fisiología animal, ya que permite la transformación de los alimentos en sustancias que el organismo puede utilizar para generar energía, reparar tejidos, mantener la homeostasis y sostener funciones vitales. En términos generales, este sistema realiza cuatro funciones esenciales: ingestión, digestión (mecánica y química), absorción y eliminación. Cada una de estas etapas depende de la acción coordinada de estructuras especializadas a lo largo del tracto gastrointestinal, así como de órganos accesorios como las glándulas salivales, el hígado y el páncreas, cuyas secreciones son indispensables para el adecuado procesamiento del alimento (Pérez, 2013).

Desde una perspectiva evolutiva, el sistema digestivo ha desarrollado adaptaciones estructurales y funcionales para responder a los diversos requerimientos nutricionales de las distintas especies animales. Así, mientras los monogástricos (como perros y cerdos) presentan un sistema relativamente simple, optimizado para dietas ricas en proteínas y carbohidratos de fácil digestión, los rumiantes, como bovinos y ovinos, han evolucionado un estómago multicameral especializado en la fermentación microbiana de fibras vegetales, proceso que les permite extraer energía de compuestos que serían indigeribles para otros animales (Reece, 2015). Por otro lado, las aves, al carecer de dientes, han desarrollado una

molleja muscular que tritura el alimento y permite su procesamiento mecánico previo a la digestión química en el proventrículo (Bishop et al., 2000).

Estas variaciones reflejan una íntima relación entre anatomía, función fisiológica y tipo de alimentación, permitiendo que cada especie explote al máximo su nicho ecológico mediante estrategias digestivas específicas (Karasov & Douglas, 2013). Las diferencias interespecíficas no solo afectan la eficiencia con la que se extraen nutrientes, sino también la forma en que el sistema digestivo interactúa con otros sistemas como el nervioso, el endocrino y el inmune, formando una red integrada que regula el apetito, el metabolismo energético, la inmunidad intestinal y el comportamiento alimentario (Sjaastad et al., 2016).

A lo largo de este capítulo se abordarán las características anatómicas y funcionales del sistema digestivo, analizando en detalle los mecanismos moleculares implicados en la digestión de macronutrientes, la absorción de vitaminas y minerales, la regulación hormonal y nerviosa del tránsito gastrointestinal, y la participación de la microbiota intestinal en la salud digestiva y sistémica del animal. Además, se presentará un enfoque comparado entre especies de interés veterinario, incluyendo monogástricos, rumiantes y aves con el fin de proporcionar al lector una comprensión integradora de las adaptaciones digestivas evolutivas y su impacto clínico.

## **Objetivos**

- Describir la estructura y función del sistema digestivo en la transformación de los alimentos en nutrientes esenciales para el organismo.
- Analizar las fases del proceso digestivo y su influencia en la digestión, absorción y aprovechamiento de los nutrientes.
- Explicar el papel del sistema digestivo en la producción de energía y su integración con el metabolismo celular.
- Identificar los mecanismos de control fisiológico que regulan la digestión, incluyendo la acción del sistema nervioso entérico y las hormonas digestivas.

- Comparar las adaptaciones del sistema digestivo en distintas especies, relacionándolas con sus hábitos alimenticios y requerimientos fisiológicos.

### **Preguntas de Enfoque**

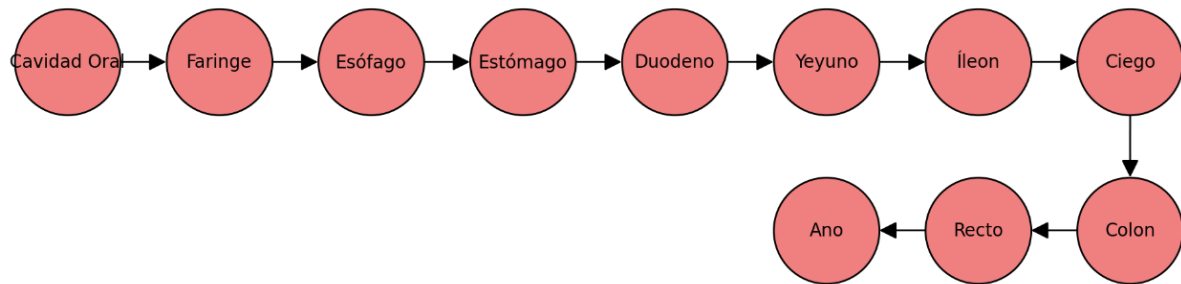
1. ¿Cómo se adapta el sistema digestivo de un herbívoro para extraer nutrientes de materiales vegetales difíciles de digerir, comparado con el de un carnívoro?
2. ¿De qué manera las secreciones digestivas (saliva, jugo gástrico, bilis, jugo pancreático) contribuyen a la degradación de cada tipo de nutriente?
3. ¿Qué hormonas intestinales intervienen cuando un animal comienza a ingerir alimento y cómo coordinan la digestión a lo largo del tracto gastrointestinal?
4. ¿Por qué es importante la microbiota intestinal para la nutrición y la salud general del animal? ¿Qué ocurriría si se altera abruptamente esta comunidad microbiana?
5. ¿Cómo logra el sistema digestivo equilibrar la necesidad de absorber nutrientes con la de impedir la entrada de patógenos o toxinas del medio externo?

### **Cavidad oral, saliva y funciones digestivas iniciales**

El sistema digestivo es un conjunto de órganos interrelacionados cuya función primordial es transformar los alimentos en nutrientes aprovechables por el organismo (Sjaastad et al., 2016). Aunque su diseño anatómico varía según las necesidades nutricionales y adaptativas de cada especie, en líneas generales se compone de diversas secciones y órganos accesorios que actúan de forma coordinada para garantizar la digestión, la absorción y la eliminación de los alimentos (Jiao et al., 2023).

Para facilitar la comprensión del recorrido anatómico que sigue el alimento desde su ingreso al organismo hasta su eliminación, la Figura 6 presenta una representación esquemática del flujo digestivo. Este diagrama permite visualizar de manera clara y secuencial cada una de las estructuras involucradas, destacando la

organización funcional del sistema digestivo y la relación entre sus diferentes segmentos.



**Figura 6.** Flujo del Alimento en el Sistema Digestivo

**Fuente:** Figura elaborada por el autor

### **Cavidad Oral y Anexos**

La cavidad oral constituye la primera estación del proceso digestivo y desempeña un papel crucial en la preparación del alimento para su posterior procesamiento. En ella se integran diversas estructuras que facilitan la captura, manipulación y masticación. Los labios y las mejillas colaboran en retener el alimento y en la formación del bolo, mientras que la lengua no solo ayuda a mezclar y manipular el alimento, sino que también participa en la percepción del gusto y en la iniciación de la masticación (Niemiec et al., 2020). El paladar, al separar la cavidad bucal de la nasal, asegura una adecuada dirección del alimento durante la deglución.

La saliva, secretada por las glándulas salivales, facilita la digestión y protege la mucosa oral gracias a su contenido de agua, electrolitos, enzimas digestivas, mucinas e inmunoglobulinas (Niemiec et al., 2020).

Para comprender la relevancia fisiológica de la saliva en el proceso digestivo inicial, es indispensable revisar su composición química y funcional. La Tabla 4 presenta de manera organizada los principales componentes de la saliva y explica el papel que desempeña cada uno de ellos en la protección de la mucosa oral, el mantenimiento del equilibrio ácido-base y la facilitación de la digestión. Esta

información permite visualizar cómo un fluido aparentemente simple integra moléculas con funciones altamente especializadas que contribuyen de forma decisiva al inicio de la digestión y a la homeostasis bucal.

**Tabla 4.** Composición de la saliva

| Componente                                                                                | Función                                                                                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Agua</b>                                                                               | Principal componente de la saliva, facilita la deglución y disolución de sustancias.               |
| <b>Electrolitos</b>                                                                       | Mantienen el equilibrio osmótico y ayudan en la regulación del pH salival.                         |
| <b>Iones (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)</b> | Regulan la homeostasis del medio bucal, neutralizan ácidos y facilitan la remineralización dental. |
| <b>Proteínas</b>                                                                          | Incluyen proteínas con funciones antimicrobianas, lubricantes y protectoras.                       |
| <b>Lisozima</b>                                                                           | Enzima con actividad antimicrobiana que degrada la pared celular bacteriana.                       |
| <b>Lactoferrina</b>                                                                       | Se une al hierro libre, inhibiendo el crecimiento de bacterias dependientes de hierro.             |
| <b>Histatinas</b>                                                                         | Poseen actividad antimicrobiana y antifúngica, protegiendo la mucosa oral.                         |
| <b>Peroxidasa Salival</b>                                                                 | Neutraliza peróxidos y protege contra el daño oxidativo en la cavidad bucal.                       |
| <b>Enzimas</b>                                                                            | Grupo de proteínas que facilitan la digestión de carbohidratos y lípidos.                          |
| <b>Amilasa</b>                                                                            | Hidroliza el almidón en azúcares simples para facilitar su digestión.                              |
| <b>Lipasa</b>                                                                             | Hidroliza lípidos, facilitando su digestión en el sistema digestivo.                               |
| <b>Mucinas</b>                                                                            | Lubrican y protegen la mucosa oral, evitando la adhesión de microorganismos patógenos.             |
| <b>Anticuerpos</b>                                                                        | Defienden contra microorganismos patógenos en la mucosa oral.                                      |
| <b>IgA Secretora</b>                                                                      | Principal anticuerpo en la saliva, previene infecciones al impedir la adhesión bacteriana.         |
| <b>Factores de Crecimiento</b>                                                            | Regulan procesos de reparación tisular y desarrollo celular.                                       |
| <b>Epidermal Growth Factor (EGF)</b>                                                      | Estimula la proliferación y regeneración epitelial en la mucosa oral y esofágica.                  |
| <b>Nerve Growth Factor (NGF)</b>                                                          | Favorece la regeneración y crecimiento de las fibras nerviosas en tejidos orales y digestivos.     |

**Fuente:** Adaptado de Ticona Vidal et al. (2021)

Además de su compleja composición bioquímica, la saliva cumple funciones esenciales en la digestión, la protección inmunológica y el mantenimiento de la integridad de la cavidad oral. La Tabla 5 resume estas funciones y las relaciona con los componentes específicos que las hacen posibles, permitiendo al lector identificar de manera clara cómo cada elemento salival participa en procesos clave como la lubricación, la defensa antimicrobiana, la regulación del pH y la percepción del gusto. Esta tabla complementa la información previa y ofrece una visión integrada del rol multifuncional de la saliva en la fisiología digestiva.

**Tabla 5.** Funciones de la Saliva

| Función                                     | Descripción                                                                    | Componentes Involucrados                                                                                       |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Digestión</b>                            | Inicia la digestión de carbohidratos y grasas en la boca.                      | Amilasa, Lipasa                                                                                                |
| <b>Protección Antimicrobiana</b>            | Elimina bacterias, virus y hongos, previniendo infecciones.                    | Lisozima, Lactoferrina, Histatinas, Peroxidasa Salival, IgA Secretora                                          |
| <b>Lubricación y Deglución</b>              | Facilita el paso del bolo alimenticio y protege la mucosa oral.                | Mucinas, Agua                                                                                                  |
| <b>Regulación del pH y Remineralización</b> | Mantiene el equilibrio ácido-base y protege los dientes contra la caries.      | Bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), Sodio ( $\text{Na}^+$ ), Potasio ( $\text{K}^+$ ), Cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) |
| <b>Cicatrización y Regeneración</b>         | Favorece la curación de heridas y el crecimiento de tejidos.                   | Factores de Crecimiento (EGF, NGF)                                                                             |
| <b>Percepción del Gusto</b>                 | Disuelve sustancias para que sean detectadas por las papilas gustativas.       | Agua, Electrolitos                                                                                             |
| <b>Eliminación de Residuos</b>              | Arrastra restos de alimentos y microorganismos para mantener la higiene bucal. | Agua, Mucinas                                                                                                  |
| <b>Hidratación de la Mucosa Oral</b>        | Evita la resequedad y mantiene la boca saludable.                              | Agua, Mucinas                                                                                                  |

**Fuente:** Adaptado de Vidal et al. (2021)

En conclusión, la saliva es un fluido multifuncional esencial en el proceso digestivo, la protección bucal y la homeostasis oral (Ticona et al., 2021). Sus diversos componentes trabajan de manera conjunta para garantizar una adecuada digestión, defensa inmunológica y salud de los tejidos bucales (Jiao et al., 2023).

## **Deglución y tránsito esofágico**

Una vez formado el bolo alimenticio, este es desplazado hacia la faringe mediante un proceso voluntario que da paso a una serie de respuestas reflejas. La deglución involucra el cierre de la nasofaringe, la elevación de la laringe y el desplazamiento del bolo al esófago. Este tubo muscular transporta el alimento hacia el estómago mediante ondas peristálticas, reguladas por el sistema nervioso central y entérico (Cunningham & Klein, 2009). La coordinación neuromuscular es fundamental para evitar el reflujo y asegurar una dirección unidireccional del bolo alimenticio.

Tras el procesamiento inicial de los alimentos en la cavidad oral, el bolo alimenticio debe ser transportado de manera segura hacia el estómago mediante una secuencia coordinada de movimientos musculares.

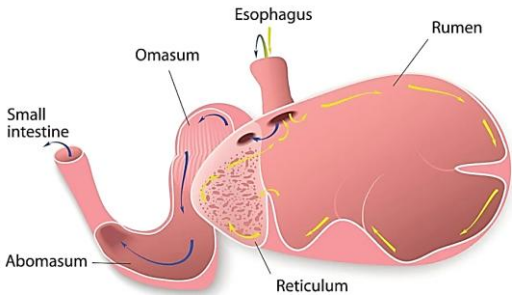
## **Estómago y digestión gástrica**

El estómago actúa como una cámara de mezcla y digestión, donde el alimento es sometido a una combinación de procesos mecánicos y químicos. En animales monogástricos, como perros y cerdos, el estómago consta de una sola cavidad que secreta ácido clorhídrico, pepsina, mucus y otras sustancias necesarias para iniciar la degradación de proteínas (Reece, 2015). En rumiantes, sin embargo, existen cuatro compartimentos: rumen, retículo, omaso y abomaso. Solo este último presenta secreciones similares al estómago de los monogástricos, mientras que los primeros realizan fermentación microbiana (Jason, 2023).

El vaciamiento gástrico depende de señales hormonales (como la gastrina) y nerviosas, regulando la liberación del contenido hacia el duodeno. Este proceso asegura que el quimo llegue a la siguiente sección del tracto digestivo en condiciones óptimas para la digestión y absorción (Palomo et al., 2018).

Debido a la gran diversidad alimentaria entre especies, el estómago ha desarrollado adaptaciones morfofuncionales que optimizan la digestión según el tipo de dieta. Mientras que los animales monogástricos realizan la digestión principalmente mediante procesos enzimáticos y ácido gástrico, los rumiantes y otros herbívoros requieren compartimentos especializados que permiten la fermentación microbiana previa. Para visualizar de manera clara estas diferencias, la Tabla 6 compara las características esenciales del estómago monocavitario y el policavitario, incluyendo su anatomía, función digestiva y especies representativas. Esta comparación facilita comprender cómo la estructura estomacal determina estrategias digestivas específicas en animales domésticos y de interés veterinario.

**Tabla 6.** Estómago Monocavitario vs. Policavitario

| Característica             | Estómago Monocavitario                                                              | Estómago Policavitario                                                                      |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Imagen</b>              |  |         |
| <b>Definición</b>          | Estómago con una sola cavidad donde ocurre la digestión química y mecánica.         | Estómago dividido en múltiples compartimentos con funciones especializadas en la digestión. |
| <b>Ejemplo de especies</b> | Perros, gatos, cerdos, humanos, caballos.                                           | Rumiantes (bovinos, ovinos, caprinos), algunos marsupiales.                                 |
| <b>Proceso digestivo</b>   | La digestión ocurre principalmente                                                  | La digestión inicia con la fermentación microbiana antes de la acción enzimática.           |

|                                            |                                                  |                                                                                                                                              |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                            | mediante enzimas y jugos gástricos.              |                                                                                                                                              |
| <b>Fermentación microbiana</b>             | Mínima o ausente, dependiendo de la dieta.       | Presente en los compartimentos iniciales (rumen, retículo y omaso), donde microorganismos descomponen celulosa y otros compuestos vegetales. |
| <b>Eficiencia en la digestión de fibra</b> | Baja, requiere alimentos más digestibles.        | Alta, permite la degradación de materiales vegetales complejos.                                                                              |
| <b>Compartimentos</b>                      | Único (estómago).                                | Cuatro en rumiantes (rumen, retículo, omaso y abomaso).                                                                                      |
| <b>Función principal</b>                   | Digestión ácida y enzimática de macronutrientes. | Fermentación previa seguida de digestión ácida y enzimática.                                                                                 |

**Fuente:** Adaptado de Fernando et al. (2023)

Tras la digestión gástrica, el quimo pasa al intestino delgado, donde se lleva a cabo la fase más intensiva de digestión y absorción de nutrientes.

### Intestino Delgado

El intestino delgado es el principal sitio para la digestión química y la absorción de nutrientes. Anatómicamente se divide en tres segmentos: el duodeno, el yeyuno y el íleon. El duodeno es la porción inicial que recibe las secreciones del páncreas y del hígado (bilis), fundamentales para la emulsificación de grasas y la acción de enzimas digestivas como amilasas, proteasas y lipasas. El yeyuno continúa este proceso y representa la región más activa en la absorción de nutrientes, mientras que el íleon completa la absorción y participa en la defensa inmunológica mediante el tejido linfoide asociado al intestino (GALT) (Bartel, 2022).

La estructura histológica de la mucosa intestinal está altamente especializada para la absorción. Las vellosidades y microvellosidades aumentan considerablemente la superficie de contacto, optimizando la transferencia de nutrientes desde el lumen intestinal hacia los capilares sanguíneos y linfáticos (Eurell & Frappier, 2006). Además, enzimas producidas por las células epiteliales, junto con

las del jugo pancreático, hidrolizan los macronutrientes a sus formas absorbibles: monosacáridos, aminoácidos y ácidos grasos libres (Eurell & Frappier, 2006).

## **Intestino Grueso y Absorción de Agua**

El intestino grueso está conformado por el ciego, colon y recto. Su principal función es la absorción de agua y electrolitos, así como la formación y almacenamiento de las heces. En especies herbívoras como equinos y conejos, el intestino grueso juega un papel crucial en la fermentación microbiana de la fibra vegetal no digerida previamente. Esta fermentación da lugar a la producción de ácidos grasos volátiles (AGV) como el acetato, propionato y butirato, que son absorbidos y utilizados como fuentes energéticas (Romero, 2008).

La microbiota intestinal contribuye significativamente a la salud del hospedador al participar en la fermentación de sustratos no digeribles, la síntesis de vitaminas del complejo B y vitamina K, y la modulación del sistema inmunológico. La composición y actividad de esta microbiota varía entre especies, edad, dieta y estado fisiológico del animal (Garza et al., 2021).

## **Órganos Accesorios**

Los órganos accesorios incluyen al hígado, el páncreas y, en algunas especies, la vesícula biliar. Estos órganos no forman parte del tubo digestivo propiamente dicho, pero su función es esencial en los procesos digestivos.

- **Hígado:** produce bilis, que contiene sales biliares necesarias para la emulsificación de las grasas. Además, participa en el metabolismo de carbohidratos, lípidos y proteínas, y actúa como órgano detoxificador (Hall & Hall, 2020).
- **Páncreas:** tiene una función dual. La porción exocrina secreta enzimas digestivas (amilasa, lipasa, tripsina, quimotripsina, entre otras) y bicarbonato, que neutraliza la acidez del quimo gástrico. La porción endocrina regula la glicemia mediante la secreción de insulina y glucagón (Bartel, 2022).

- **Vesícula biliar:** presente en varias especies, almacena y concentra la bilis entre comidas, liberándola al intestino delgado en respuesta a la ingestión de grasas. Algunas especies, como el caballo, carecen de vesícula biliar, y la bilis es secretada de forma continua (Lindenmeyer, 2022).

Estas estructuras accesorias aseguran una digestión eficiente de los alimentos y una adecuada absorción de nutrientes, manteniendo la homeostasis energética y metabólica del organismo.

## **Fisiología Digestiva: Procesos, Regulación y Aspectos Moleculares**

La fisiología digestiva comprende los procesos mediante los cuales los alimentos son transformados en nutrientes absorbibles y utilizados por el organismo. Estos procesos están organizados en fases claramente definidas y son regulados por mecanismos nerviosos, hormonales y moleculares altamente coordinados (Hall & Hall, 2020).

### **Fases de la Digestión**

1. **Ingestión:** La ingestión es el primer paso, en el cual el alimento es captado y llevado a la boca. Este proceso está regulado por centros cerebrales que responden a señales neurológicas y hormonales. Hormonas como la ghrelina, liberada por el estómago durante el ayuno, estimulan el apetito, mientras que la leptina, producida por el tejido adiposo, contribuye a la sensación de saciedad (Gallagher, 2020). De este modo, se regula la cantidad y el momento de la ingesta alimentaria.
2. **Digestión Mecánica y Química:** La digestión comienza en la cavidad oral con la masticación, que reduce el tamaño de los alimentos y los mezcla con la saliva, iniciando la digestión química gracias a la acción de la amilasa salival. Una vez ingerido, el alimento llega al estómago, donde las contracciones musculares (motilidad gástrica) mezclan el quimo con jugos gástricos (Gallagher, 2020). El ácido clorhídrico y la pepsina, entre otros componentes, inician la degradación de las proteínas, mientras que el mucus

protege la mucosa estomacal. En el intestino delgado, el quimo se expone a un abanico de enzimas pancreáticas e intestinales que continúan la degradación de macromoléculas en compuestos más simples, esenciales para la absorción (Rogel et al., 2019).

3. **Absorción Intestinal:** La absorción se produce principalmente en el intestino delgado, cuya pared está adaptada para maximizar el contacto entre el quimo y los enterocitos. La presencia de vellosidades y microvellosidades incrementa la superficie de absorción, facilitando el transporte de monosacáridos, aminoácidos, ácidos grasos y otros nutrientes hacia la circulación sanguínea y linfática, para que puedan ser distribuidos a todas las células del organismo (Gallagher, 2020).
4. **Eliminación:** La fase final del proceso digestivo es la eliminación, que tiene lugar en el intestino grueso. Aquí, se absorbe la mayor parte del agua y los electrolitos, lo que permite la formación y compactación de las heces (Gallagher, 2020). Este tránsito intestinal está regulado para asegurar la eliminación eficaz de desechos y mantener la homeostasis del sistema digestivo.

## **Secreciones Digestivas y Regulación Hormona**

El proceso digestivo está regulado por un conjunto de secreciones y mecanismos hormonales que garantizan la digestión eficiente de los alimentos (Gallagher, 2020). Cada etapa, desde la llegada del alimento al estómago hasta su absorción en el intestino, está finamente modulada por señales químicas que ajustan la secreción de jugos digestivos, la motilidad del tracto gastrointestinal y la absorción de nutrientes.

Las hormonas digestivas regulan la secreción de jugos gástricos, la motilidad y la absorción de nutrientes. En la siguiente tabla se resumen sus funciones:

Dado que la actividad del sistema digestivo depende estrechamente de la coordinación hormonal, resulta fundamental identificar cuáles son las hormonas involucradas y cómo actúan en cada etapa del proceso digestivo. Estas señales químicas regulan funciones esenciales como la secreción de enzimas, el

vaciamiento gástrico, la motilidad intestinal y la liberación de bilis. Para facilitar la comprensión de estos mecanismos, la Tabla 7 presenta un resumen organizado de las principales hormonas digestivas, su origen y su función específica dentro de la regulación fisiológica del tracto gastrointestinal.

**Tabla 7.** Hormonas Digestivas y sus Funciones

| Hormona                                 | Órgano de Secreción               | Función Principal                                                                                                                                         |
|-----------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Gastrina</b>                         | Células G del estómago            | Estimula la secreción de ácido clorhídrico y enzimas gástricas, promoviendo la digestión de proteínas y la motilidad gástrica.                            |
| <b>Secretina</b>                        | Células S del duodeno             | Induce la liberación de bicarbonato por el páncreas para neutralizar el ácido del quimo en el intestino delgado.                                          |
| <b>Colecistocinina (CCK)</b>            | Células I del duodeno y yeyuno    | Estimula la contracción de la vesícula biliar para liberar bilis y promueve la secreción de enzimas pancreáticas. También regula el vaciamiento gástrico. |
| <b>Ghrelin</b>                          | Células del estómago              | Aumenta la sensación de hambre y estimula la motilidad gastrointestinal. Se secreta en el ayuno.                                                          |
| <b>Motilina</b>                         | Duodeno e íleon                   | Coordina los complejos motores migratorios durante el ayuno, favoreciendo la limpieza del tracto digestivo.                                               |
| <b>Somatostatina</b>                    | Células D del páncreas y estómago | Inhibe la secreción de otras hormonas digestivas, regula la motilidad gástrica y disminuye la producción de ácido.                                        |
| <b>Péptido Inhibidor Gástrico (GIP)</b> | Intestino delgado                 | Disminuye la secreción de ácido gástrico y estimula la liberación de insulina.                                                                            |
| <b>GLP-1 y GLP-2</b>                    | Células L del intestino           | GLP-1 potencia la secreción de insulina y ralentiza el vaciamiento gástrico. GLP-2 promueve la regeneración de la mucosa intestinal.                      |
| <b>Neurotensina</b>                     | Intestino delgado                 | Regula la motilidad intestinal y la secreción gástrica.                                                                                                   |
| <b>Enteroglucagón</b>                   | Intestino delgado                 | Inhibe la producción de ácido gástrico y modula la motilidad intestinal.                                                                                  |

**Fuente:** Adaptado de García & López (2007)

## Digestión y Absorción de Macronutrientes

La digestión y absorción de los macronutrientes (carbohidratos, proteínas y lípidos) implican mecanismos complejos a nivel molecular, que incluyen procesos enzimáticos específicos, transportadores especializados en las membranas celulares y adaptaciones fisiológicas según la dieta del animal.

### a) Carbohidratos

La digestión de los carbohidratos comienza en la cavidad oral con la acción de la amilasa salival, especialmente importante en monogástricos como humanos y cerdos, mientras que es poco significativa en rumiantes y otros herbívoros estrictos. En el intestino delgado, la amilasa pancreática continúa degradando el almidón en maltosa y dextrinas limitantes. Posteriormente, enzimas del borde en cepillo de los enterocitos (maltasa, sacarasa-isomaltasa, lactasa) completan la degradación a monosacáridos absorbibles, principalmente glucosa, fructosa y galactosa (Calvo, 2023).

Los monosacáridos se absorben mediante transportadores específicos:

- **Glucosa y Galactosa:** Absorbidas activamente a través del transportador dependiente de sodio-glucosa tipo 1 (SGLT1). Este transporte activo secundario depende del gradiente electroquímico generado por la bomba  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -ATPasa en la membrana basolateral del enterocito (Calvo, 2023).
- **Fructosa:** Absorbida mediante difusión facilitada a través del transportador GLUT5, independiente del sodio.
- **Salida hacia la circulación:** Todos estos monosacáridos abandonan el enterocito hacia el torrente sanguíneo mediante GLUT2, presente en la membrana basolateral. Adicionalmente, GLUT2 puede insertarse temporalmente en la membrana apical cuando las concentraciones lumenales de glucosa son elevadas, incrementando significativamente la capacidad absorbente intestinal.

## b) Proteínas

La digestión proteica comienza en el estómago con la secreción de ácido clorhídrico (HCl), que desnaturaliza las proteínas y activa la pepsina. La pepsina inicia la digestión hidrolizando proteínas en péptidos de menor tamaño. Este proceso continúa en el intestino delgado con enzimas pancreáticas como tripsina, quimotripsina, elastasa y carboxipeptidasas, que degradan aún más estos péptidos en pequeños oligopéptidos y aminoácidos libres (Calvo, 2023).

La digestión final ocurre en el borde en cepillo de los enterocitos mediante aminopeptidasas y dipeptidasas, generando aminoácidos libres, di- y tripéptidos (Calvo, 2023). Estos productos son absorbidos a través de transportadores específicos en las membranas apicales:

- **Aminoácidos libres:** Transportadores específicos dependientes de sodio (co-transporte con  $\text{Na}^+$ ) y transportadores independientes de sodio, según el tipo y carga del aminoácido.
- **Di- y tripéptidos:** Absorbidos eficientemente por el transportador PEPT1, que usa un gradiente de protones ( $\text{H}^+$ ) generado por un intercambiador  $\text{Na}^+/\text{H}^+$ , dependiente indirectamente del  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -ATPasa (Daniel & Zietek, 2015).

Dentro del enterocito, los péptidos son hidrolizados completamente a aminoácidos libres antes de ingresar a la circulación portal hacia el hígado.

## c) Lípidos

La digestión y absorción de lípidos es particularmente compleja debido a su naturaleza hidrofóbica. Este proceso depende de la formación y acción de micelas facilitadas por la bilis secretada por el hígado y almacenada en la vesícula biliar (excepto en especies como equinos, que carecen de vesícula biliar) (Noriega, 2011).

El proceso se divide en varias etapas:

1. **Emulsificación:** Las sales biliares descomponen grandes gotas lipídicas en micelas más pequeñas, aumentando la superficie disponible para la lipasa pancreática.
2. **Digestión química:** La lipasa pancreática degrada los triglicéridos en monoglicéridos y ácidos grasos libres. La colipasa, una coenzima pancreática, facilita la unión y acción de la lipasa sobre las micelas lipídicas.
3. **Absorción:** Los ácidos grasos libres y monoglicéridos atraviesan la membrana apical del enterocito por difusión simple o mediante transportadores específicos como FAT/CD36 y FABP (proteínas de unión a ácidos grasos), aunque la difusión pasiva sigue siendo el principal mecanismo.
4. **Resíntesis y formación de quilomicrones:** Dentro del enterocito, los ácidos grasos y monoglicéridos son reesterificados en triglicéridos y ensamblados en quilomicrones junto con colesterol, fosfolípidos y apolipoproteínas específicas como ApoB-48. Estos quilomicrones son exocitados al espacio intersticial y entran en la circulación linfática a través de los vasos quilíferos, evitando inicialmente la circulación hepática y alcanzando directamente el torrente sanguíneo.

## **Motilidad Gastrointestinal**

La motilidad gastrointestinal es el conjunto de movimientos musculares que permiten el transporte y mezcla del contenido digestivo a lo largo del tracto digestivo. Estos movimientos son esenciales para la digestión y absorción de nutrientes, además de facilitar la eliminación de desechos.

Los principales tipos de movimientos en el tubo digestivo incluyen las ondas peristálticas, la segmentación, los complejos motores migratorios y las contracciones tónicas (Noriega, 2011). Las ondas peristálticas impulsan el alimento en una dirección, mientras que la segmentación permite mezclar el contenido intestinal con las secreciones digestivas, favoreciendo su contacto con la mucosa para mejorar la absorción. Durante los periodos de ayuno, los complejos motores

migratorios barren los residuos digestivos y evitan el sobrecrecimiento bacteriano. Además, las contracciones tónicas en los esfínteres regulan el flujo del contenido entre las diferentes secciones del tracto digestivo, asegurando una digestión ordenada (Noriega, 2011).

La siguiente tabla resume las principales características de estos movimientos:

**Tabla 8.** Tipos de Movimientos Gastrointestinales

| <b>Tipo de Movimiento</b>                  | <b>Función</b>                                                         | <b>Ubicación Principal</b>                                  | <b>Mecanismo</b>                                                                              |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ondas peristálticas</b>                 | Transporte del contenido                                               | Esófago, estómago, intestino delgado y colon                | Contracciones progresivas de la musculatura lisa que empujan el contenido en dirección distal |
| <b>Segmentación</b>                        | Mezcla del contenido con secreciones digestivas                        | Intestino delgado y colon                                   | Contracciones rítmicas localizadas que no tienen función propulsora, sino de mezcla           |
| <b>Complejos Motores Migratorios (CMM)</b> | Limpieza del tracto digestivo durante el ayuno                         | Estómago e intestino delgado                                | Secuencias de contracciones intensas y rítmicas que eliminan residuos y bacterias             |
| <b>Contracciones tónicas</b>               | Regulación del paso del contenido entre segmentos del tracto digestivo | Esfínteres (esofágico inferior, pilórico, ileocecal y anal) | Contracciones sostenidas que regulan la apertura y cierre de los esfínteres                   |

**Fuente:** Adaptado de Noriega (2011)

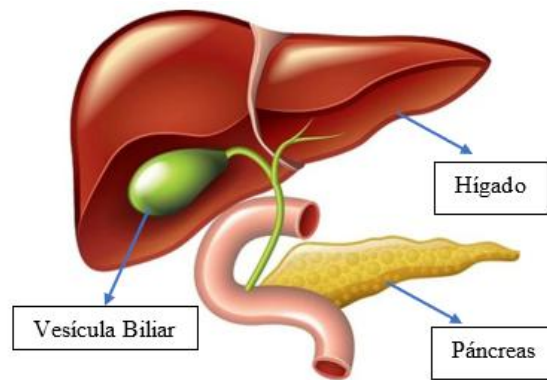
La regulación de la motilidad depende de la acción conjunta del sistema nervioso entérico, las hormonas digestivas y los reflejos nerviosos. El sistema nervioso entérico ejerce esta regulación a través de dos plexos principales: el plexo mientérico (de Auerbach), que controla predominantemente la frecuencia, intensidad y coordinación de las contracciones musculares responsables del tránsito gastrointestinal; y el plexo submucoso (de Meissner), que regula las

secreciones glandulares locales, el flujo sanguíneo intestinal y la actividad sensorial relacionada con estímulos químicos y mecánicos (Romero et al., 2012). Hormonas digestivas como la gastrina, la colecistocinina (CCK) y la motilina modulan adicionalmente la motilidad, adaptándola según la fase digestiva y las necesidades específicas del organismo. Asimismo, reflejos como el gastroentérico y el enterogástrico ajustan la velocidad del tránsito intestinal en respuesta a estímulos locales, garantizando una digestión y absorción eficientes.

### **Papel del Hígado y Páncreas en la Digestión**

El hígado y el páncreas son órganos accesorios esenciales en el proceso digestivo, cuya función va más allá de la mera secreción de sustancias; actúan de manera coordinada para optimizar la transformación de los alimentos en nutrientes aprovechables y para integrar la digestión con el metabolismo general del organismo (Cáscales & Doadrio, 2019).

Para comprender de manera integrada la participación del hígado, la vesícula biliar y el páncreas en la digestión, es útil visualizar su disposición anatómica y sus relaciones funcionales. Estos órganos accesorios actúan de forma coordinada para regular la producción y liberación de bilis, así como la secreción de enzimas pancreáticas indispensables para la digestión química. La Figura 7 ilustra de manera esquemática esta integración anatómica, facilitando la comprensión de cómo cada estructura contribuye a los procesos digestivos iniciales y al procesamiento eficiente de los nutrientes.



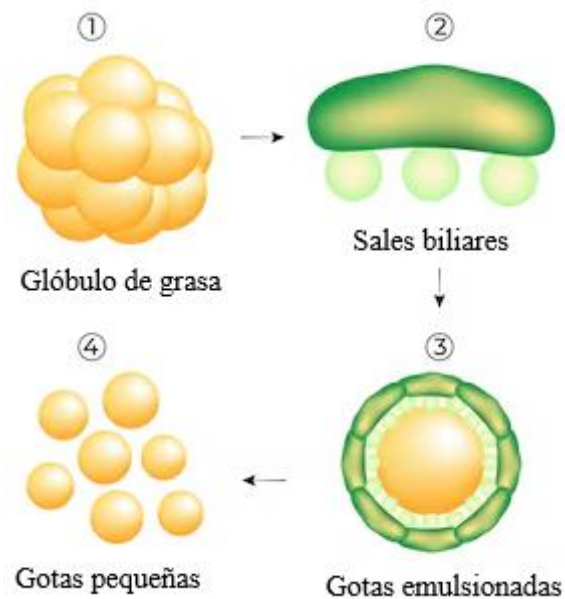
**Figura 7.** Anatomía y relación funcional del hígado, vesícula biliar y páncreas en la digestión

**Fuente:** Riaño & Suárez (2006)

### **Hígado**

El hígado es un órgano multifuncional que desempeña roles cruciales en la digestión y en el metabolismo. Su función principal en la digestión se centra en la producción de bilis, una sustancia que juega un papel vital en la emulsificación de las grasas. La bilis, compuesta de ácidos biliares, colesterol, fosfolípidos y pigmentos biliares, se almacena en la vesícula biliar y se libera en el duodeno en respuesta a la ingesta de alimentos grasos (Cáscales & Doadrio, 2019). Al emulsificar las grasas, la bilis descompone las grandes gotas de lípidos en pequeñas micelas, aumentando significativamente el área de superficie sobre la que puede actuar la lipasa pancreática. Este proceso facilita la degradación de triglicéridos en ácidos grasos y monoglicéridos, que luego pueden ser absorbidos por las células del intestino.

La digestión de los lípidos requiere un proceso especializado que permita superar la baja solubilidad de las grasas en el medio acuoso intestinal. La bilis, mediante la acción de sus sales biliares, es esencial para fragmentar los glóbulos grasos en gotas más pequeñas, aumentando significativamente su superficie de contacto para la acción enzimática. La Figura 8 representa este proceso de emulsificación, mostrando de forma clara cómo las sales biliares transforman las grasas en micelas más accesibles para la lipasa pancreática, facilitando su descomposición y posterior absorción.



**Figura 8.** Emulsión de grasas

**Fuente:** Hamja (2025)

Además de su función en la digestión de grasas, el hígado es crucial en el metabolismo y almacenamiento de nutrientes. Participa en la conversión y almacenamiento de carbohidratos en forma de glucógeno, en la síntesis y degradación de proteínas, y en la metabolización de lípidos. También cumple una importante función detoxificadora, eliminando sustancias tóxicas del organismo y transformándolas en compuestos más solubles que pueden ser excretados (Cáscales & Doadrio, 2019). La síntesis de proteínas plasmáticas, como la albúmina, es otra función esencial del hígado, contribuyendo al mantenimiento del equilibrio osmótico y al transporte de moléculas en la sangre. En conjunto, el hígado actúa como un centro metabólico y de coordinación que integra los nutrientes absorbidos, regulando su distribución y disponibilidad para las células del organismo.

## Páncreas

El páncreas es un órgano con funciones duales que complementan el proceso digestivo de manera integral. Por un lado, su función exocrina se encarga de la producción y liberación de enzimas digestivas que se vierten en el intestino delgado a través de un sistema de conductos (Cáscales & Doadrio, 2019). Entre estas enzimas destacan:

- **Amilasa:** Inicia la degradación de los carbohidratos, transformando almidones en azúcares más simples.
- **Lipasa:** Actúa sobre las grasas, descomponiéndolas en ácidos grasos y monoglicéridos, facilitada por la emulsificación previa realizada por la bilis.
- **Tripsina y Quimotripsina:** Son enzimas proteolíticas que degradan las proteínas en péptidos y aminoácidos, esenciales para la absorción y síntesis proteica (Cáscales & Doadrio, 2019).

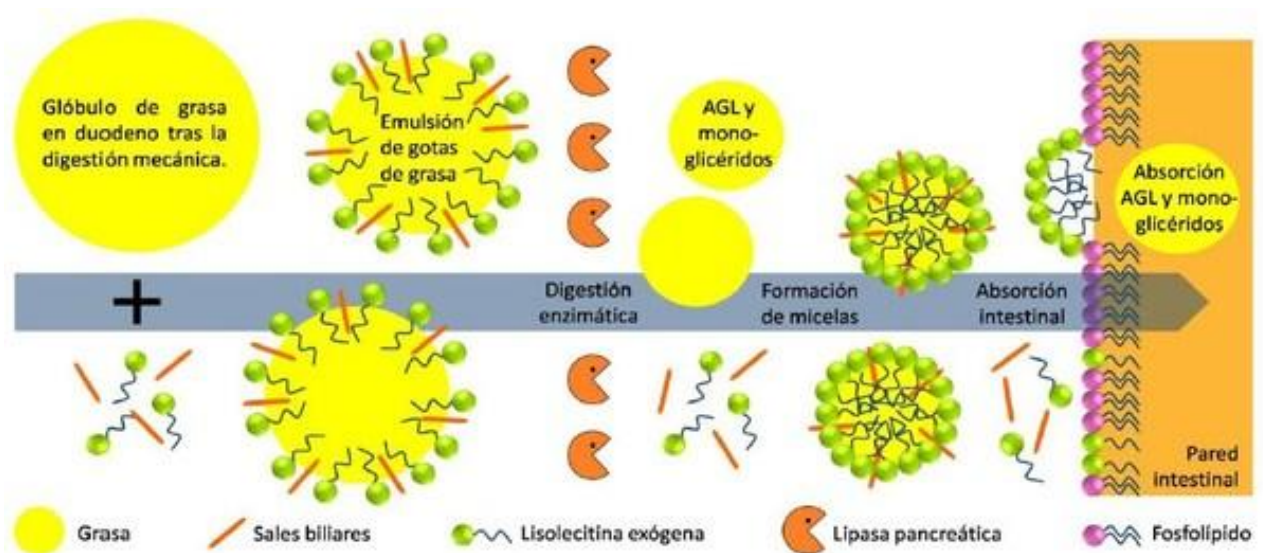
Junto a estas enzimas, el páncreas secreta bicarbonato, el cual neutraliza el quimo ácido proveniente del estómago, creando un ambiente óptimo para la acción de las enzimas en el intestino delgado y protegiendo la mucosa intestinal de la agresividad del ácido (Cáscales & Doadrio, 2019).

Por otro lado, la función endocrina del páncreas se centra en la regulación de la glucosa en sangre, un proceso que conecta la digestión con el metabolismo energético global. Las células de los islotes pancreáticos producen dos hormonas fundamentales:

- **Insulina:** Facilita la captación y almacenamiento de glucosa por parte de las células, reduciendo los niveles de azúcar en la sangre tras la ingesta de alimentos (Cáscales & Doadrio, 2019).
- **Glucagón:** Actúa en condiciones de ayuno, estimulando la liberación de glucosa desde el hígado para asegurar un suministro continuo de energía (Cáscales & Doadrio, 2019).

Esta dualidad funcional del páncreas es clave para la integración del proceso digestivo con la regulación metabólica. Mientras las enzimas digestivas y el bicarbonato aseguran la adecuada descomposición y neutralización del alimento en el intestino delgado, la secreción de insulina y glucagón coordina la utilización y almacenamiento de los nutrientes, manteniendo la homeostasis energética en el organismo (Cáscales & Doadrio, 2019).

La transformación de los lípidos en moléculas absorbibles requiere una secuencia coordinada de procesos mecánicos, químicos y enzimáticos que ocurren principalmente en el tubo digestivo proximal. Después de la emulsificación inicial realizada por las sales biliares, intervienen enzimas específicas como la lipasa pancreática, que actúan sobre las gotas lipídicas para generar ácidos grasos y monoglicéridos listos para su absorción. Para visualizar este proceso de manera integrada, la Figura 9 representa de forma esquemática cada una de las etapas de la digestión de las grasas, desde la acción emulsificante de la bilis hasta la formación de micelas y su absorción final por el epitelio intestinal.



**Figura 9.** Digestión de las grasas

**Fuente:** Adiveter (2020)

En resumen, el hígado y el páncreas son pilares fundamentales en la digestión y el metabolismo. El hígado, mediante la producción de bilis y su rol en el metabolismo y detoxificación, y el páncreas, a través de sus funciones exocrinas y endocrinas, trabajan de forma integrada para transformar los alimentos en nutrientes esenciales y regular su distribución y utilización, asegurando así el equilibrio y la salud general del organismo.

Dado que la digestión química depende de una amplia variedad de enzimas secretadas a lo largo del tracto gastrointestinal y por órganos accesorios como el páncreas y las glándulas salivales, resulta útil presentar una visión integradora de todas ellas. La siguiente tabla resume las principales enzimas digestivas, su origen y su función fisiológica, proporcionando un marco claro para comprender su papel en la transformación de los alimentos.

**Tabla 9.** Enzimas digestivas y sus funciones

| <b>Enzima</b>                     | <b>Origen / Sitio de Secreción</b> | <b>Sustrato(s)</b> | <b>Función Principal</b>                                                          |
|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Amilasa salival (ptialina)</b> | Glándulas salivales                | Almidón            | Inicia la digestión de carbohidratos convirtiendo almidón en maltosa y dextrinas. |
| <b>Amilasa pancreática</b>        | Páncreas exocrino                  | Almidón            | Continúa la digestión del almidón hasta maltosa, maltotriosa y dextrinas.         |
| <b>Lipasa lingual</b>             | Glándulas linguales                | Triglicéridos      | Hidroliza triglicéridos de cadena corta, importante en neonatos.                  |
| <b>Lipasa gástrica</b>            | Estómago (células principales)     | Triglicéridos      | Hidroliza triglicéridos parcialmente; funciona en pH ácido.                       |

|                               |                                                              |                       |                                                                                     |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Pepsina</b>                | Estómago (células principales → pepsinógeno activado por pH) | Proteínas             | Inicia la proteólisis, rompe enlaces peptídicos produciendo péptidos grandes.       |
| <b>Renina (quimosina)</b>     | Estómago de neonatos                                         | Caseína               | Coagula la leche para favorecer la digestión en rumiantes y neonatos.               |
| <b>Tripsina</b>               | Páncreas (tripsinógeno → activado por enteropeptidasa)       | Proteínas             | Degrada péptidos en fragmentos más pequeños, activa otras proenzimas pancreáticas.  |
| <b>Quimotripsina</b>          | Páncreas (quimotripsinógeno)                                 | Proteínas             | Rompe enlaces aromáticos; complementa la acción de la tripsina.                     |
| <b>Elastasa</b>               | Páncreas                                                     | Elastina y proteínas  | Degrada proteínas ricas en elastina.                                                |
| <b>Carboxipeptidasa A y B</b> | Páncreas                                                     | Péptidos              | Rompen enlaces peptídicos desde el extremo carboxilo, liberando aminoácidos libres. |
| <b>Lipasa pancreática</b>     | Páncreas                                                     | Triglicéridos         | Principal enzima digestiva de grasas; hidroliza ácidos grasos y monoglicéridos.     |
| <b>Colipasa</b>               | Páncreas                                                     | Actúa con lipasa      | Permite que la lipasa actúe en presencia de ácidos biliares.                        |
| <b>Fosfolipasa A2</b>         | Páncreas                                                     | Fosfolípidos          | Hidroliza fosfolípidos en lisofosfolípidos y ácidos grasos.                         |
| <b>Colesterol esterasa</b>    | Páncreas                                                     | Ésteres de colesterol | Hidroliza ésteres de colesterol para facilitar su absorción.                        |

|                                                |                                 |                   |                                                                                      |
|------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Nucleasas pancreáticas (ADNasa, ARNasa)</b> | Páncreas                        | Ácidos nucleicos  | Degradan ADN y ARN en nucleótidos.                                                   |
| <b>Disacaridasas del borde en cepillo</b>      | Intestino delgado (enterocitos) | Disacáridos       | Hidrolizan carbohidratos finales para su absorción.                                  |
| - <b>Lactasa</b>                               | Intestino delgado               | Lactosa           | Produce glucosa + galactosa.                                                         |
| - <b>Sacarasa</b>                              | Intestino delgado               | Sacarosa          | Produce glucosa + fructosa.                                                          |
| - <b>Maltasa</b>                               | Intestino delgado               | Maltosa           | Produce dos glucosas.                                                                |
| - <b>Isomaltasa</b>                            | Intestino delgado               | Dextrinas         | Rompe enlaces $\alpha$ -1,6 del almidón.                                             |
| <b>Aminopeptidasas</b>                         | Intestino delgado               | Péptidos pequeños | Rompen enlaces peptídicos desde el extremo amino.                                    |
| <b>Dipeptidasas y tripeptidasas</b>            | Intestino delgado               | Di- y tripéptidos | Finalizan la digestión proteica en el borde en cepillo.                              |
| <b>Enteropeptidasa</b>                         | Intestino delgado               | Tripsinógeno      | Activa el tripsinógeno en tripsina, iniciando la cascada de proenzimas pancreáticas. |

**Fuente:** Adaptado de Hall & Hall (2020).

Al completar la revisión de los órganos accesorios clásicos como el hígado y páncreas y su papel esencial en la digestión de macronutrientes, resulta necesario ampliar la mirada hacia un componente igualmente determinante pero frecuentemente subestimado: la microbiota intestinal. Mientras que los órganos digestivos aportan enzimas, bilis y mecanismos bioquímicos directos, la microbiota actúa como un sistema metabólico complementario que modula, transforma y optimiza numerosos procesos digestivos y nutricionales. Su participación no solo potencia la eficiencia de la digestión, sino que influye en la inmunidad, el metabolismo energético y la homeostasis general del huésped, convirtiéndose en

un actor clave que integra funciones locales y sistémicas dentro del ecosistema intestinal.

## **Papel de la Microbiota Intestinal en Nutrición y Salud Digestiva**

El tracto gastrointestinal alberga una diversa y compleja comunidad microbiana denominada microbiota intestinal, compuesta principalmente por bacterias, pero también por arqueas, protozoos, hongos y virus (Chen et al., 2022). Esta comunidad actúa simbióticamente con el hospedador, contribuyendo significativamente a múltiples aspectos fisiológicos relacionados con la digestión, la nutrición, la regulación inmunológica y el mantenimiento de la salud general del animal (Soriano, 2021).

## **Funciones Nutricionales de la Microbiota Intestinal**

La microbiota participa activamente en la digestión y fermentación de componentes dietéticos que el hospedador por sí mismo no puede digerir, especialmente en herbívoros. En rumiantes como bovinos, ovinos y caprinos, el rumen alberga una microbiota especializada capaz de fermentar fibras vegetales como celulosa y hemicelulosa, produciendo ácidos grasos volátiles (AGV) tales como acetato, propionato y butirato. Estos AGV constituyen la principal fuente de energía metabólica para el rumiante, pudiendo cubrir hasta el 70-80% de sus requerimientos energéticos diarios (Soriano, 2021).

El propionato generado por la fermentación microbiana es especialmente crucial porque representa la principal fuente de glucosa vía gluconeogénesis hepática, considerando que la glucosa dietaria en rumiantes prácticamente no alcanza el intestino delgado (Soriano, 2021), los microorganismos ruminales sintetizan aminoácidos esenciales y vitaminas del complejo B y vitamina K, facilitando que estos animales prosperen con dietas pobres en nutrientes específicos o nitrógeno proteico. En consecuencia, una microbiota ruminal saludable permite que el animal tenga una alimentación más flexible y eficiente (Chen et al., 2022).

En herbívoros no rumiantes, como caballos y conejos, la fermentación microbiana ocurre predominantemente en el ciego y colon, generando AGV que cubren parcialmente sus necesidades energéticas. En conejos, el fenómeno de la cecotrofia permite recuperar proteínas y vitaminas microbianas generadas en el ciego mediante la reingestión de cecotropos, maximizando el aprovechamiento de nutrientes derivados de la microbiota.

En especies omnívoras o carnívoras, aunque la fermentación microbiana es menos prominente, la microbiota del colon produce cantidades significativas de AGV (especialmente butirato) que sirven como fuente energética primaria para los colonocitos, manteniendo la integridad y función epitelial. Además, la microbiota sintetiza vitamina K y contribuye al metabolismo de compuestos dietéticos complejos (Soriano, 2021).

### **Regulación Inmunológica y Protección de la Mucosa Intestinal**

La microbiota intestinal también desempeña un papel crítico en la regulación y modulación del sistema inmunológico del hospedador. El contacto constante de microorganismos intestinales con el tejido linfoide asociado al intestino (GALT) educa al sistema inmunitario, promoviendo una respuesta inmunológica equilibrada y tolerancia frente a antígenos dietéticos y bacterias comensales (Tizard, 2009).

Las bacterias intestinales, además, compiten directamente con microorganismos patógenos por nichos ecológicos y nutrientes (exclusión competitiva), lo que disminuye la colonización y proliferación de especies patógenas. Esta función protectora está mediada también por la producción de sustancias antimicrobianas como bacteriocinas, ácidos grasos de cadena corta (especialmente butirato y acetato) y ácidos orgánicos, que reducen el pH y crean un ambiente desfavorable para patógenos (Tizard, 2009).

## **Interacción Molecular Microbiota-Huésped**

A nivel molecular, la interacción microbiota-hospedador es compleja e incluye la señalización mediada por receptores de reconocimiento de patrones microbianos (PRRs) como los receptores tipo Toll (TLRs). Estos receptores, expresados en células epiteliales y células inmunitarias intestinales, reconocen componentes bacterianos específicos, activando vías de señalización que modulan la respuesta inflamatoria y la integridad intestinal (Sordelli, 2020).

Además, metabolitos bacterianos como el butirato no solo sirven como fuentes energéticas locales, sino que también actúan como moléculas señalizadoras a nivel sistémico, modulando la expresión genética en células epiteliales intestinales y regulando la secreción de hormonas intestinales, como el GLP-1, implicado en la regulación del apetito y metabolismo de la glucosa (Sordelli, 2020).

La microbiota desempeña un papel determinante en la digestión, especialmente en especies con fermentación microbiana avanzada, lo que explica las diversas adaptaciones digestivas observadas entre animales domésticos.

## **Adaptaciones Digestivas en Especies Veterinarias**

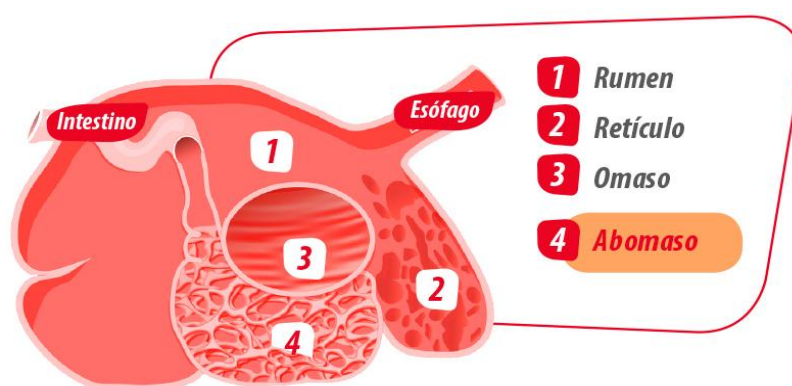
La diversidad de estrategias digestivas entre los animales refleja una extensa historia evolutiva, donde cada especie ha desarrollado estructuras y procesos específicos para optimizar la obtención y aprovechamiento de nutrientes según su dieta y ambiente (Gambini & Martin, 2010). En esta sección se abordan exhaustivamente las adaptaciones en el sistema digestivo de distintas especies veterinarias, enfatizando particularmente las diferencias entre animales monogástricos y rumiantes, así como las particularidades observadas en aves, equinos, conejos, peces, reptiles y especies exóticas.

## Diferencias entre Monogástricos y Rumiantes

Los animales monogástricos, como perros, cerdos y humanos, poseen un sistema digestivo compuesto por un único estómago que realiza digestión mecánica y química inicial mediante jugos gástricos (Pilla & Suchodolski, 2021). Por otra parte, los rumiantes, incluyendo bovinos, ovinos y caprinos, presentan un sistema estomacal multicameral altamente adaptado a la fermentación de fibras vegetales complejas gracias a la actividad microbiana simbiótica (González, 2019).

### Estructura del Estómago Rumiante

En los rumiantes, la digestión adquiere características particulares debido a la presencia de un estómago altamente especializado, dividido en cuatro compartimentos que permiten procesar eficientemente materiales vegetales ricos en fibra. Este sistema, único en los herbívoros estrictos, combina mecanismos mecánicos, fermentativos y enzimáticos que actúan de manera secuencial para optimizar el aprovechamiento energético de los forrajes. Para visualizar la disposición y función general de estas cámaras digestivas, la Figura 10 muestra de manera esquemática la estructura del estómago rumiante y la organización de sus compartimentos principales.



**Figura 10.** Compartimentos del Estómago en Rumiantes

**Fuente:** Rumiantes (2023)

El estómago de los rumiantes está dividido en cuatro compartimentos especializados, cada uno con funciones específicas en la digestión y fermentación de los alimentos. A diferencia de los monogástricos, los rumiantes dependen de la actividad microbiana para descomponer la celulosa y extraer energía de materiales vegetales complejos (Tardiolo et al., 2025).

Cada uno de los compartimentos del estómago rumiante cumple funciones específicas que permiten la fermentación, descomposición mecánica y digestión progresiva del alimento. Estas cámaras, además de diferir estructural y funcionalmente, actúan de manera coordinada para asegurar un procesamiento eficiente de la fibra vegetal y una absorción óptima de nutrientes. Para comprender de forma comparativa el papel fisiológico de cada sección, la Tabla 10 resume las principales funciones y características del rumen, retículo, omaso y abomaso, proporcionando una visión clara y ordenada del aporte de cada compartimento al proceso digestivo de los rumiantes.

**Tabla 10.** Funciones y características de los compartimentos gástricos de los rumiantes

| Compartimento   | Función Principal                           | Características                                                                                                                                                                                                                              |
|-----------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Rumen</b>    | Cámara de fermentación                      | Contiene una microbiota diversa (bacterias, protozoos y hongos) que descompone la celulosa y otros polisacáridos. Produce ácidos grasos volátiles (AGVs) que sirven como fuente de energía. Su pH neutro favorece la fermentación anaerobia. |
| <b>Retículo</b> | Captura de partículas y formación del bolo  | Su estructura en forma de panal facilita la retención de partículas finas y la recirculación del alimento. Trabaja en conjunto con el rumen para distribuir la microbiota y regular el tamaño de las partículas antes de la rumia.           |
| <b>Omaso</b>    | Absorción de agua y reducción de partículas | Presenta múltiples hojas o láminas que aumentan la superficie de absorción de agua y electrolitos. Reduce aún más el tamaño del alimento antes de su paso al abomaso.                                                                        |

|                |                      |                                                                                                                                                                                                                          |
|----------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Abomaso</b> | Digestión enzimática | Es el "estómago verdadero" de los rumiantes. Secreta ácido clorhídrico y enzimas digestivas como la pepsina, que inician la degradación de proteínas en péptidos más pequeños, similar al estómago de los monogástricos. |
|----------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**Fuente:** Adaptado de Tardiolo et al. (2025)

El funcionamiento coordinado de estos compartimentos permite que los rumiantes maximicen el aprovechamiento de los forrajes mediante la fermentación microbiana, la rumia y la absorción progresiva de nutrientes.

**Rumia y Eructo**

La rumia es un proceso fisiológico característico y esencial de los rumiantes, mediante el cual el animal regurgita porciones del alimento previamente ingerido y parcialmente fermentado en el rumen. Este contenido ruminal regurgitado es sometido nuevamente a la masticación (remasticación), lo que facilita una reducción adicional del tamaño de las partículas fibrosas, incrementando significativamente su superficie expuesta para una fermentación microbiana más efectiva (Tardiolo et al., 2025).

Durante la rumia, además de reducirse mecánicamente el tamaño de las partículas alimenticias, se mezcla intensamente el material con una cantidad considerable de saliva. En bovinos, la producción diaria de saliva puede oscilar entre 100 y 200 litros, dependiendo de la dieta y el comportamiento de ingestión. Esta saliva contiene importantes componentes amortiguadores, como bicarbonato y fosfato, que desempeñan un papel crucial en la regulación del pH ruminal. Mantener un pH ruminal relativamente estable (alrededor de 6.0 a 6.8) es fundamental para asegurar un ambiente óptimo para el crecimiento y actividad de la microbiota ruminal, particularmente las bacterias fibrolíticas responsables de la degradación de celulosa y hemicelulosa (Tardiolo et al., 2025).

La rumia no es solo un mecanismo mecánico, sino que implica una compleja coordinación neuromuscular que depende del sistema nervioso central y entérico. Este proceso involucra una secuencia precisa de movimientos que incluyen la relajación del esfínter esofágico inferior, contracciones antiperistálticas del esófago y movimientos coordinados del retículo y rumen que permiten la elevación y expulsión del alimento parcialmente fermentado hacia la boca.

Por otro lado, el eructo es un mecanismo fisiológico igualmente vital en rumiantes. Durante la fermentación microbiana en el rumen, se generan grandes volúmenes de gases, principalmente dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y metano ( $\text{CH}_4$ ), en proporciones variables según el tipo de dieta. La producción diaria de estos gases puede alcanzar entre 400 y 600 litros en bovinos adultos, lo que requiere un eficiente mecanismo de expulsión para evitar distensión excesiva del rumen y posibles trastornos como el timpanismo (bloat) (Tardiolo et al., 2025).

El eructo implica la contracción coordinada de la musculatura ruminal que empuja los gases hacia el retículo y la región superior del esófago, donde son expulsados rápidamente a través de la cavidad oral y nasal. Este proceso es regulado por reflejos nerviosos específicos que se activan en respuesta a la presión ruminal y a la presencia de gas en la zona dorsal del rumen. Cualquier interferencia en estos reflejos, la motilidad ruminal o la permeabilidad esofágica puede derivar en acumulación excesiva de gases, poniendo en riesgo la vida del animal debido a la compresión diafragmática que limita la respiración y compromete la circulación sanguínea.

En conjunto, la rumia y el eructo constituyen mecanismos evolutivos especializados que permiten a los rumiantes utilizar eficientemente dietas fibrosas mediante una fermentación microbiana efectiva, manteniendo simultáneamente el equilibrio homeostático del ambiente ruminal.

## Papel de la Microbiota

La microbiota del rumen está constituida por una comunidad diversa y compleja de microorganismos, incluyendo bacterias, protozoarios, hongos anaerobios y arqueas, que establecen una relación simbiótica esencial con el animal hospedador. Estos microorganismos desempeñan un papel crucial en la fermentación anaerobia del material vegetal consumido, especialmente componentes fibrosos como la celulosa, hemicelulosa y pectina, que los rumiantes no podrían digerir eficientemente mediante sus propias enzimas endógenas (Tardiolo et al., 2025).

Las bacterias ruminales constituyen la fracción dominante y más diversa de la microbiota, agrupándose funcionalmente según su sustrato preferido. Las bacterias celulolíticas y hemicelulolíticas, como *Fibrobacter succinogenes*, *Ruminococcus albus* y *Ruminococcus flavefaciens*, poseen enzimas especializadas, como celulasas y hemicelulasas, capaces de descomponer eficientemente la fibra vegetal en azúcares simples. Estos azúcares son posteriormente fermentados hasta ácidos grasos volátiles (AGV), principalmente acetato, propionato y butirato, los cuales constituyen la principal fuente energética absorbible en la pared ruminal.

Otros grupos importantes incluyen las bacterias amilolíticas, como *Streptococcus bovis* y *Prevotella ruminicola*, especializadas en la fermentación de almidones y azúcares no estructurales, que predominan cuando la dieta del rumiante contiene cantidades significativas de granos o concentrados. Estos microorganismos contribuyen a la producción de propionato, una fuente clave para la gluconeogénesis hepática en los rumiantes, especialmente relevante en vacas lecheras y animales en crecimiento rápido (Tardiolo et al., 2025).

Por otro lado, los protozoarios ruminales, principalmente ciliados como *Entodinium*, *Isotricha* y *Epidinium*, aunque menos numerosos, pueden representar una fracción significativa del volumen total de biomasa ruminal. Su papel incluye la digestión y almacenamiento de almidón y bacterias, modulando la tasa de fermentación bacteriana y el flujo de proteína microbiana hacia el abomaso e

intestino delgado, influyendo así en la eficiencia global de utilización del nitrógeno dietario.

Los hongos anaerobios, aunque presentes en menor proporción, cumplen un rol esencial al facilitar la degradación inicial de las fibras vegetales mediante sus poderosas enzimas lignocelulolíticas (Pilla & Suchodolski, 2021). Estos hongos penetran físicamente la pared celular vegetal, rompiendo la lignina y celulosa estructural, facilitando así la posterior acción bacteriana.

Asimismo, las arqueas metanogénicas del rumen, principalmente del género *Methanobrevibacter*, utilizan hidrógeno producido por la fermentación bacteriana para reducir dióxido de carbono a metano (CH<sub>4</sub>). Aunque esta producción de metano implica pérdidas energéticas para el animal y representa un desafío ambiental debido a su potencial efecto invernadero, también cumple una función fisiológica esencial al eliminar hidrógeno y mantener bajas presiones parciales de este gas en el rumen, facilitando una fermentación eficiente y continua (Tardiolo et al., 2025).

La microbiota ruminal no solo es fundamental para la digestión de la fibra y generación de energía, sino que además participa activamente en la síntesis de proteínas microbianas y vitaminas del complejo B y K, esenciales para el huésped. Estas proteínas microbianas constituyen una parte significativa del aporte proteico absorbido en el intestino delgado, siendo particularmente importante en dietas pobres en proteína verdadera pero con suficiente nitrógeno no proteico (como urea), utilizado por los microorganismos para su propia síntesis proteica.

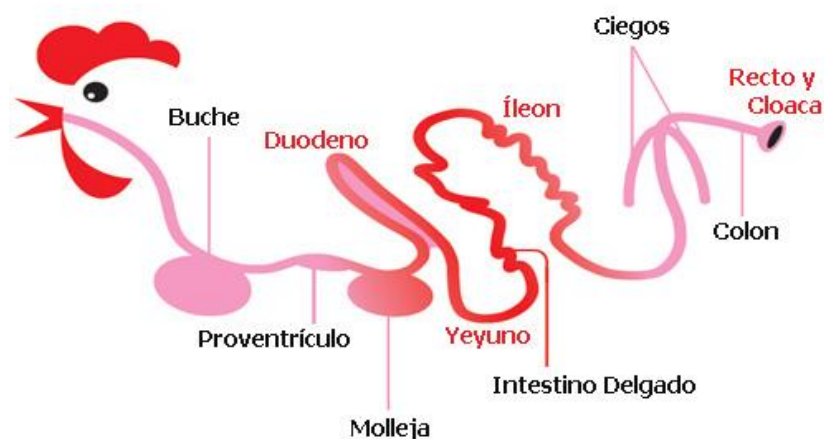
La estabilidad y composición de la microbiota ruminal dependen estrechamente de la dieta suministrada al animal. Cambios bruscos en la dieta pueden alterar rápidamente la composición microbiana, generando desequilibrios (disbiosis) que pueden derivar en trastornos digestivos serios como acidosis ruminal, timpanismo y disminución en la eficiencia productiva. Por ello, la gestión nutricional apropiada es clave para mantener un equilibrio saludable en la comunidad microbiana del rumen, asegurando así una fermentación estable y eficiente.

En síntesis, la microbiota ruminal es un componente indispensable para la digestión y metabolismo en rumiantes, desempeñando funciones vitales que permiten a estos animales aprovechar eficientemente dietas fibrosas, y cuyo conocimiento profundo es crucial para optimizar la salud y productividad animal.

### **Adaptaciones Digestivas en Aves**

El sistema digestivo de las aves presenta adaptaciones notables para compensar la ausencia de dientes y para optimizar el procesamiento de alimentos en función de su dieta y estilo de vida (Rodríguez et al., 2017).

Para comprender mejor estas particularidades anatómicas, resulta fundamental visualizar la disposición de los principales órganos que intervienen en el tránsito, almacenamiento y procesamiento del alimento en las aves. La Figura 11 presenta de manera esquemática la estructura del sistema digestivo aviar, destacando segmentos especializados como el buche, el proventrículo, la molleja y la cloaca, cuyas funciones integradas permiten compensar la ausencia de dientes y asegurar un procesamiento eficiente de los alimentos.



**Figura 11.** Estructura del Sistema Digestivo en Aves

**Fuente:** Pico (2016)

## Estructura Especializada

- **Pico:** La forma y estructura del pico está altamente adaptada al tipo de alimento que consume cada especie (granívoras, insectívoras, nectarívoras, carnívoras). El pico reemplaza las funciones de prehensión, corte o perforación que en otros animales realizan los dientes.
- **Buche:** Actúa como un reservorio temporal donde el alimento es almacenado y ablandado antes de continuar su tránsito. Permite a las aves ingerir grandes cantidades de alimento rápidamente, que luego se procesan de manera controlada. En algunas especies como palomas, el buche también secreta una sustancia nutritiva (leche de buche) para alimentar a las crías.
- **Proventrículo:** Es el estómago glandular donde se secretan ácido clorhídrico y enzimas digestivas (principalmente pepsina). Esta etapa inicia la degradación química del alimento, preparándolo para la acción mecánica posterior en la molleja.
- **Molleja:** La molleja es un órgano muscular especializado que se encarga de triturar mecánicamente el alimento, utilizando la acción de contracciones potentes. En muchas aves, la molleja contiene pequeñas piedras o gránulos ingeridos, que actúan como un molino, permitiendo la descomposición física de alimentos duros, como semillas o granos (Rodríguez et al., 2017).
- **Intestino delgado:** Lugar de digestión química final y absorción de nutrientes. Suele ser relativamente corto en aves carnívoras y más largo en aves herbívoras, reflejando el tiempo necesario para digerir diferentes tipos de alimentos.
- **Cloaca:** Cámara común donde confluyen los sistemas digestivo, urinario y reproductivo. El material fecal y urinario (principalmente ácido úrico) se excreta simultáneamente.

## **Digestión sin Dientes**

Debido a la falta de estructuras masticatorias, las aves dependen completamente de la acción combinada del proventrículo y la molleja para procesar los alimentos. El proventrículo inicia la digestión química, mientras que la molleja tritura físicamente el alimento, aumentando su superficie de exposición a las enzimas digestivas y facilitando la absorción posterior.

Esta estrategia compensa la incapacidad de las aves para masticar y les permite mantener un tránsito digestivo rápido, optimizado para un metabolismo elevado y para necesidades específicas como el vuelo.

## **Ciegos y su Función en la Digestión en Aves**

Las aves poseen dos ciegos, estructuras en forma de sacos ubicadas en la unión entre el intestino delgado y el intestino grueso. Estos órganos cumplen varias funciones relevantes:

- **Fermentación microbiana:** En especies granívoras y herbívoras, los ciegos permiten la fermentación de fibras vegetales y carbohidratos no digeribles, produciendo ácidos grasos volátiles (AGVs) que son absorbidos como fuente adicional de energía.
- **Absorción de agua y electrolitos:** Los ciegos contribuyen a la regulación hídrica, permitiendo la reabsorción de agua en condiciones de restricción hídrica o climas áridos.
- **Función inmunológica:** Los ciegos también actúan como sitios de interacción inmune, participando en la educación del sistema inmunitario intestinal y en la defensa contra patógenos.
- **Regulación del microbioma intestinal:** Mantienen el equilibrio de microorganismos beneficiosos, protegiendo la homeostasis del tracto digestivo.

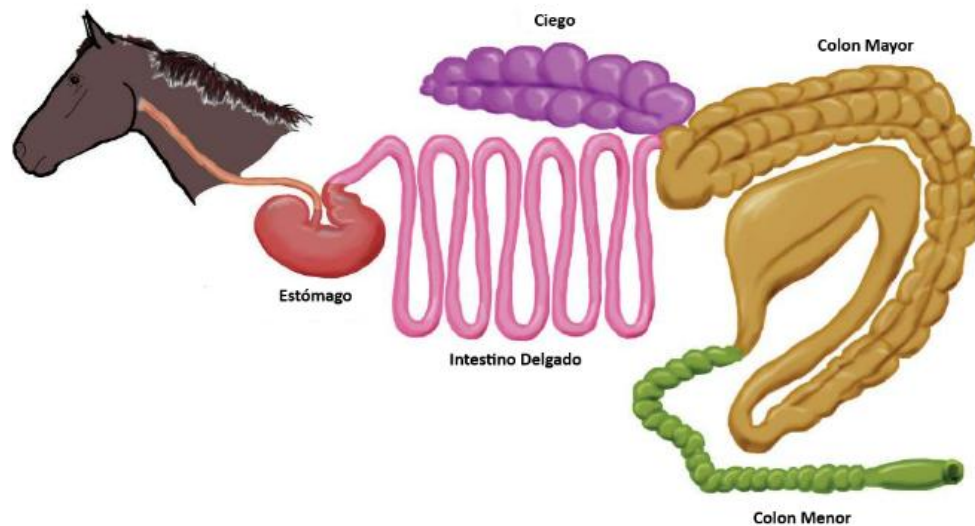
Cabe destacar que el tamaño y funcionalidad de los ciegos varían notablemente entre especies: en gallinas, patos y gansos son altamente desarrollados; en aves carnívoras o nectarívoras, como halcones y colibríes, son poco desarrollados o incluso rudimentarios (Rodríguez et al., 2017).

## **Adaptaciones Digestivas en Equinos**

Los caballos, como animales herbívoros monogástricos, han desarrollado un sistema digestivo especializado para la fermentación y digestión de grandes volúmenes de fibra vegetal. A diferencia de los rumiantes, los equinos no tienen un estómago compartimentado, pero su intestino grueso está altamente desarrollado para la fermentación microbiana de la celulosa y otros carbohidratos estructurales (Martinez, 1994).

### **Características del Sistema Digestivo Equino**

La Figura 12 ilustra la organización anatómica del sistema digestivo equino, permitiendo visualizar la disposición del estómago, intestino delgado, ciego y colon. Esta representación es clave para entender cómo la gran capacidad fermentativa del intestino grueso sustenta el comportamiento herbívoro del caballo y su eficiente aprovechamiento de dietas ricas en fibra.



**Figura 12.** Sistema digestivo del caballo: estructura del aparato gastrointestinal

**Fuente:** Huguet & Duberstein (2023)

El sistema digestivo del caballo presenta particularidades que lo diferencian de otros herbívoros, especialmente de los rumiantes. Aunque los equinos poseen un estómago monogástrico, su capacidad digestiva depende en gran medida de la fermentación microbiana que ocurre en el intestino grueso, lo que les permite aprovechar forrajes fibrosos como el heno y el pasto (Martínez, 1994).

A diferencia de los rumiantes, la fermentación de la fibra no ocurre en el estómago, sino en el ciego y el colon. Esta adaptación permite la producción de ácidos grasos volátiles (AGVs), que representan una fuente clave de energía para el caballo. Sin embargo, el proceso fermentativo posgástrico es menos eficiente en la extracción de energía comparado con el rumen bovino.

El estómago del caballo es relativamente pequeño (8-10% del volumen del tracto digestivo total), con una digestión rápida y constante. Además, presenta una división anatómica en zona no glandular (más propensa a úlceras) y zona glandular, separadas por el margo plicatus. Esta característica, combinada con un flujo continuo de ácido gástrico y la imposibilidad de vomitar, hace que los caballos sean particularmente susceptibles a trastornos como la úlcera gástrica y los cólicos.

La saliva equina, secretada continuamente durante la masticación, tiene un rol fundamental al aportar grandes cantidades de bicarbonato, neutralizando parcialmente la acidez gástrica y protegiendo la mucosa estomacal. La reducción del tiempo de masticación o dietas altas en concentrados puede disminuir la producción salival, aumentando el riesgo de patologías digestivas.

En cuanto a la digestión de grasas, la ausencia de vesícula biliar en los caballos obliga a una secreción continua de bilis, adaptada a su patrón natural de alimentación frecuente y fraccionada a lo largo del día.

El ciego y el colon desempeñan un papel fundamental en la digestión del caballo, ya que son los principales sitios de fermentación de la fibra (Martinez, 1994). En estas estructuras, una comunidad de bacterias y protozoos descompone los compuestos vegetales complejos y permite la absorción de nutrientes.

El colon equino se divide en dos grandes regiones (Martinez, 1994):

- **Colon mayor (o colon ascendente):** Es la porción más grande del colon, con múltiples curvaturas y saculaciones, donde ocurre gran parte de la fermentación y la absorción de ácidos grasos volátiles.
- **Colon menor (o colon descendente):** Es más delgado y se encarga de la reabsorción de agua y la formación final de las heces.

Ambas estructuras son altamente susceptibles a trastornos digestivos, sobre todo si hay cambios bruscos en la dieta.

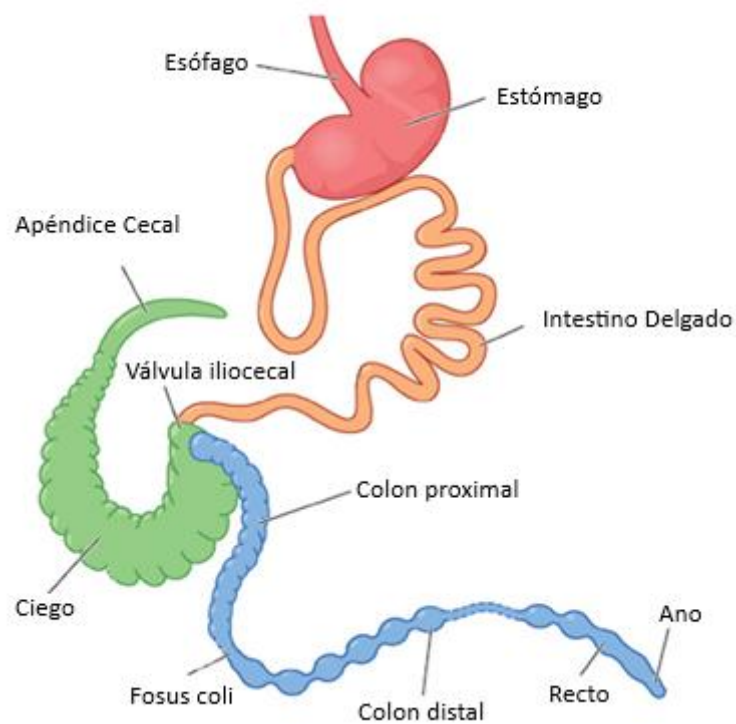
La motilidad del intestino grueso es otro factor crítico en la salud digestiva del caballo. Debido a su gran longitud y estructura con múltiples curvaturas y flexuras, el tránsito del alimento puede verse afectado por obstrucciones o acumulaciones de gas. Esta predisposición a los cólicos es una de las principales preocupaciones en la medicina equina, ya que puede comprometer seriamente la salud del animal.

En conclusión, el sistema digestivo equino es una estructura altamente especializada que combina la digestión enzimática en el intestino delgado con la fermentación microbiana en el intestino grueso. Su diseño anatómico y funcional explica la necesidad de un manejo alimenticio adecuado, basado en una dieta rica

en fibra y una ingesta fraccionada a lo largo del día, evitando cambios abruptos que puedan comprometer su bienestar digestivo.

### **Adaptaciones Digestivas en Conejos**

La Figura 13 presenta la disposición anatómica del sistema digestivo del conejo, destacando el papel central del ciego y de las porciones diferenciadas del colon en la fermentación y clasificación del contenido intestinal. Esta representación permite visualizar cómo la anatomía del conejo sostiene procesos digestivos altamente especializados, especialmente la producción de cecotrofos y la fermentación microbiana que posibilitan un aprovechamiento eficiente de dietas ricas en fibra.



**Figura 13.** Estructura del Sistema Digestivo en Conejos

**Fuente:** Duren (2021)

Los conejos (*Oryctolagus cuniculus*), como herbívoros monogástricos, han desarrollado un sistema digestivo altamente eficiente para procesar dietas ricas en fibra. A diferencia de los rumiantes, no poseen un estómago compartimentado ni una rumia activa, pero han compensado esta limitación con un ciego altamente desarrollado, donde ocurre una fermentación microbiana especializada (Romero, 2008). Esta estrategia les permite extraer nutrientes esenciales a partir de materiales vegetales fibrosos y mejorar la absorción mediante un proceso conocido como cecotrofismo.

En el caso de los herbívoros monogástricos especializados, como el conejo, la estructura del sistema digestivo presenta adaptaciones únicas que optimizan el aprovechamiento de dietas ricas en fibra. Su fisiología combina una digestión química inicial con procesos fermentativos altamente eficientes en el ciego, permitiendo extraer nutrientes esenciales a partir de materiales vegetales de baja digestibilidad. Estas adaptaciones explican características como el tránsito intestinal selectivo, la producción de cecotrofos y el reciclaje de nutrientes mediante la cecotrofia. A continuación, se detalla la organización funcional del sistema digestivo del conejo y el papel fisiológico de cada segmento.

La Tabla 11 resume las funciones principales de cada segmento del aparato digestivo del conejo, permitiendo apreciar la secuencia organizada de procesos que intervienen en la digestión, fermentación y reciclaje de nutrientes. Esta síntesis funcional evidencia cómo la estructura digestiva del conejo integra mecanismos químicos, mecánicos y microbianos que garantizan la máxima extracción de energía y nutrientes a partir de materiales vegetales de baja digestibilidad.

**Tabla 11.** Estructura del Sistema Digestivo del Conejo

| Sección                  | Función Principal                   | Características                                                                                                                                                  |
|--------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Cavidad Oral</b>      | Ingestión y masticación             | Incisivos de crecimiento continuo que cortan el forraje, molares que lo trituran. Saliva sin amilasa, lo que indica una digestión predominantemente posgástrica. |
| <b>Esófago</b>           | Transporte del bolo alimenticio     | Esfínter esofágico fuerte que impide el vómito, similar al de los caballos.                                                                                      |
| <b>Estómago</b>          | Digestión inicial                   | Ambiente altamente ácido, permitiendo una digestión continua sin periodos de ayuno. Contiene alimento en todo momento.                                           |
| <b>Intestino delgado</b> | Digestión y absorción de nutrientes | Principal sitio de absorción de proteínas, lípidos y carbohidratos. Tránsito rápido, optimizando la eficiencia digestiva.                                        |
| <b>Ciego</b>             | Fermentación microbiana             | Estructura grande donde bacterias y protozoos descomponen la celulosa y sintetizan vitaminas del complejo B. Producción de cecótrofos ricos en nutrientes.       |
| <b>Colon</b>             | Regulación del tránsito intestinal  | Separa partículas fermentables (dirigidas al ciego) de partículas no fermentables (convertidas en heces duras).                                                  |
| <b>Cecotrofismo</b>      | Reciclaje de nutrientes             | Ingestión de cecótrofos directamente del ano, permitiendo una segunda digestión y absorción de aminoácidos, vitaminas y ácidos grasos volátiles.                 |
| <b>Recto y Ano</b>       | Eliminación de desechos             | Expulsión de heces duras ricas en fibra no digerida y de cecótrofos, que son reingeridos.                                                                        |

**Fuente:** Adaptado de Romero (2008)

### **Características del Sistema Digestivo del Conejo**

El sistema digestivo del conejo está diseñado para procesar grandes cantidades de fibra y maximizar la extracción de nutrientes a través de un mecanismo de digestión en dos fases. En la primera fase, el alimento ingerido se somete a digestión gástrica y absorción intestinal. En la segunda, los nutrientes no completamente aprovechados se fermentan en el ciego, donde se forman los cecótrofos, que el conejo vuelve a ingerir para completar su absorción (Romero, 2008).

A diferencia de los rumiantes, que fermentan la fibra antes de la absorción en el rumen, los conejos realizan este proceso posgástricamente, en el ciego. Esta fermentación es llevada a cabo por una microbiota especializada que descompone la celulosa en ácidos grasos volátiles (AGVs), proporcionando una fuente adicional de energía. Además, en el ciego se sintetizan vitaminas esenciales del complejo B, que luego son aprovechadas a través del cecotrofismo (Romero, 2008).

El cecotrofismo es una de las adaptaciones más destacadas de los conejos. Consiste en la producción de heces blandas (cecótrofos), que contienen proteínas microbianas, vitaminas y otros nutrientes esenciales. Estas son ingeridas directamente del ano y reabsorbidas en el intestino delgado, asegurando una nutrición más eficiente y compensando la limitación de un solo paso digestivo.

El tránsito digestivo en los conejos es muy rápido, con un vaciamiento gástrico que ocurre en aproximadamente 3 a 6 horas. Esto les permite alimentarse frecuentemente a lo largo del día y optimizar la utilización de los nutrientes. Sin embargo, esta rapidez también los hace susceptibles a trastornos digestivos si hay un desequilibrio en su dieta. La falta de fibra puede ralentizar la motilidad intestinal, predisponiendo a la acumulación de gas y al desarrollo de íleo gastrointestinal, una de las principales causas de enfermedad digestiva en estos animales (Romero, 2008).

Otra característica crucial es que los conejos no pueden vomitar, ya que tienen un esfínter esofágico fuerte similar al de los caballos. Esto significa que cualquier obstrucción o alimentación inadecuada puede generar serios problemas digestivos (Romero, 2008). Además, su estómago siempre contiene alimento, lo que evita periodos de ayuno y garantiza una digestión continua.

El colon de los conejos tiene una función altamente especializada en la separación de partículas. Las fibras no fermentables se eliminan como heces duras, mientras que las partículas fermentables son enviadas al ciego para su descomposición microbiana y posterior formación de cecótrofos. Esta estrategia les permite aprovechar al máximo los recursos energéticos de su dieta.

En conclusión, el sistema digestivo del conejo es un modelo de eficiencia adaptativa para la digestión de dietas ricas en fibra. Su dependencia del

cecotrofismo y la fermentación cecal resalta la importancia de una alimentación adecuada, basada en forrajes de buena calidad y baja en carbohidratos simples. Un manejo dietético inadecuado puede llevar a serios trastornos digestivos, por lo que es fundamental garantizar una dieta equilibrada para mantener su bienestar fisiológico.

## **Adaptaciones Digestivas en Peces, Reptiles y Animales Exóticos**

La anatomía y fisiología del sistema digestivo en peces, reptiles y animales exóticos muestran adaptaciones específicas en función de sus hábitats, dietas y estrategias de supervivencia, ilustrando así la extraordinaria plasticidad evolutiva del proceso digestivo (Carpenter & Marion, 2023).

### **Peces**

Los peces presentan una amplia variabilidad en la estructura de su tracto digestivo, dependiendo de su dieta y ambiente acuático:

- **Tracto Digestivo:** En peces carnívoros, como la lubina o el atún, el intestino es corto y rectilíneo, diseñado para la absorción rápida de proteínas y grasas fácilmente digeribles. En contraste, los peces herbívoros, como las tilapias o los peces loro, tienen un intestino largo y enrollado, adaptado para la fermentación bacteriana y la degradación lenta de material vegetal fibroso (Carpenter & Marion, 2023).
- **Adaptaciones Acuáticas:** El medio acuático influye en la composición del quimo y en la dinámica de absorción. Algunos peces marinos tienen mecanismos de regulación osmótica que modifican la absorción intestinal de agua y solutos según la salinidad ambiental. Además, en ambientes fríos, el tránsito digestivo puede enlentecerse notablemente para conservar energía. (Carpenter & Marion, 2023).

- **Presencia de Estómago:** Algunos peces, como las carpas, tienen un estómago rudimentario o ausente, dependiendo exclusivamente de fermentaciones intestinales y digestión enzimática básica.

## Reptiles

Los reptiles, como ectotermos, adaptan su fisiología digestiva a las condiciones térmicas de su entorno: (Carpenter & Marion, 2023).

- **Metabolismo y Tiempo de Tránsito:** La digestión en reptiles es altamente dependiente de la temperatura corporal. A bajas temperaturas, la actividad enzimática disminuye, prolongando el tiempo de tránsito intestinal y aumentando la eficiencia de absorción. Esta estrategia les permite procesar grandes presas o alimentos de difícil digestión a lo largo de periodos extensos.
- **Variabilidad según la Dieta:** *Reptiles carnívoros* (como serpientes o cocodrilos): Tienen estómagos muy distensibles y una intensa secreción ácida, capaces de digerir huesos y tejidos duros. *Reptiles herbívoros* (como iguanas o tortugas terrestres): Poseen un intestino más largo, con regiones especializadas para la fermentación microbiana de celulosa, similar a los fermentadores de intestino posterior. *Reptiles omnívoros* (como algunas especies de lagartos): Muestran adaptaciones intermedias, con flexibilidad enzimática para digerir tanto proteína animal como fibra vegetal.
- **Fermentación Ceca:** Algunas tortugas terrestres y lagartos herbívoros desarrollan cámaras cecales funcionales donde ocurre fermentación bacteriana que produce ácidos grasos volátiles como fuente energética.

## Animales Exóticos

El término "animales exóticos" incluye una gran variedad de especies que presentan adaptaciones digestivas especializadas:

- **Adaptaciones Morfológicas:** *Roedores pequeños* (chinchillas, cobayos): Poseen un ciego hipertrofiado que permite una intensa fermentación de fibra vegetal. *Primates insectívoros* (lémures de cola anillada, tarseros): Tienen estómagos simples pero enzimas especializadas para digerir quitina de insectos. *Marsupiales* (como el canguro): Son fermentadores de intestino posterior muy eficientes, comparables a los caballos.
- **Flexibilidad Metabólica:** En ambientes hostiles o con recursos variables, muchos animales exóticos han desarrollado estrategias digestivas que optimizan la absorción lenta, almacenamiento energético prolongado y minimización de pérdidas hídricas (como en camélidos pequeños o reptiles del desierto).
- **Microbiota Especializada:** Muchas especies exóticas, como los perezosos o los murciélagos frugívoros, dependen de comunidades microbianas intestinales especializadas para descomponer sustancias vegetales complejas o para detoxificar compuestos secundarios de plantas (Carpenter & Marion, 2023).

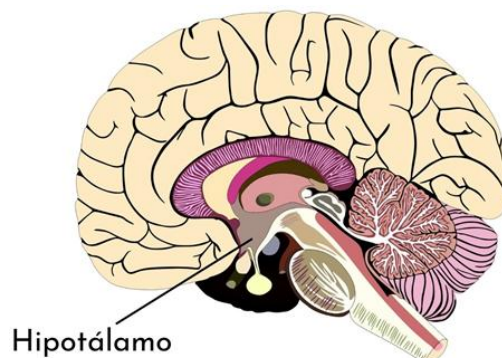
## Interacciones del Sistema Digestivo con Otros Sistemas

El sistema digestivo no funciona de manera aislada, sino que se integra estrechamente con otros sistemas corporales para asegurar la homeostasis general. Entre las interacciones más importantes se destacan la regulación neuroendocrina del apetito y la saciedad, y la relación con el sistema inmunológico (Villa, 2022). Estas conexiones permiten que los procesos digestivos se coordinen con las demandas energéticas, metabólicas e inmunológicas del organismo, garantizando una respuesta adaptativa y equilibrada ante los desafíos externos e internos.

## Regulación Neuroendocrina del Apetito y Saciedad

El control del hambre y la saciedad es fundamental para regular la ingesta de alimentos y mantener el equilibrio energético. En este proceso, el hipotálamo actúa como el principal centro integrador, recibiendo señales tanto neuronales como hormonales que informan sobre el estado nutricional del organismo (Carranza, 2016).

La Figura 14 ofrece una representación esquemática del hipotálamo, destacando su ubicación estratégica dentro del encéfalo y las regiones que participan en la integración de señales relacionadas con el apetito, la saciedad y el equilibrio energético. Esta visualización permite comprender cómo distintas áreas hipotalámicas reciben información hormonal y neuronal, constituyéndose en el principal centro regulador de la ingesta alimentaria y del estado nutricional del organismo.



**Figura 14.** Estructura anatómica del hipotálamo en el cerebro

**Fuente:** Sitja (2010)

El hipotálamo procesa señales provenientes de diversas áreas, incluyendo las del tracto gastrointestinal y del tejido adiposo, para regular la liberación de hormonas que modulan el apetito (Rodríguez, 2021). Entre estas hormonas destacan:

- **Leptina:** Producida por el tejido adiposo, la leptina informa al hipotálamo sobre las reservas de energía. Altos niveles de leptina se asocian con la

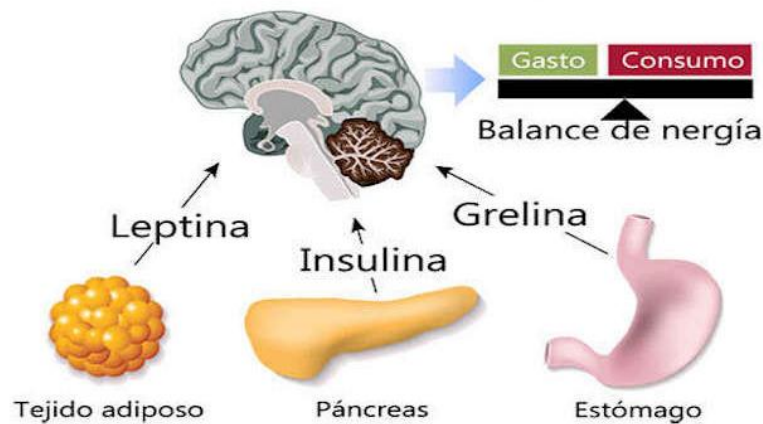
sensación de saciedad, lo que reduce la ingesta de alimentos, mientras que niveles bajos estimulan el hambre.

- **Ghrelina:** Conocida como la “hormona del hambre”, la ghrelina es secretada principalmente en el estómago y actúa sobre el hipotálamo para incrementar la sensación de hambre antes de las comidas. Su acción contrasta con la de la leptina, facilitando el inicio de la ingesta alimentaria (Rodríguez, 2021).
- **Insulina:** Además de su papel en la regulación de la glucosa en sangre, la insulina también participa en el control del apetito. El hipotálamo responde a las concentraciones de insulina, lo que ayuda a regular la ingesta y a mantener un equilibrio energético adecuado.
- **Neuropeptido Y (NPY):** Este neuropéptido, presente en el hipotálamo, es un potente estimulante del apetito. Su liberación aumenta en condiciones de ayuno, promoviendo la ingesta de alimentos (Rodríguez, 2021).
- **Orexinas:** Producidas en el hipotálamo, las orexinas influyen no solo en la regulación del sueño y la vigilia, sino también en el apetito, estimulando la ingesta de alimentos en respuesta a señales de baja energía (Rodríguez, 2021).

Estas hormonas trabajan en conjunto para mantener un equilibrio entre el hambre y la saciedad, asegurando que el organismo ingiera alimentos en función de sus necesidades energéticas. La interacción entre estas señales neuroendocrinas permite una respuesta precisa y adaptativa a las fluctuaciones en el estado nutricional, coordinando la ingesta alimentaria con la demanda metabólica (Rodríguez, 2021).

La Figura 15 sintetiza la interacción entre las principales hormonas involucradas en el control del apetito y la regulación del balance energético, mostrando cómo señales provenientes del tejido adiposo, el páncreas y el estómago convergen en el hipotálamo. Esta integración hormonal permite ajustar la sensación de hambre o saciedad según las necesidades metabólicas, ilustrando

de manera clara la coordinación entre sistemas periféricos y centrales para mantener la homeostasis energética.



**Figura 15.** Hormonas implicadas en el control del apetito y el balance energético

**Fuente:** ObesiMad (2020)

### **Relación con el Sistema Inmunológico**

El sistema digestivo desempeña un papel crucial en la defensa del organismo, no solo a través de la digestión, sino también mediante su integración con el sistema inmunológico. Una de las barreras más importantes en este sentido es el tejido linfoide asociado al intestino (GALT), que constituye la primera línea de defensa contra patógenos que ingresan por vía alimentaria (Ramiro et al., 2008).

El GALT está compuesto por agregados de tejido linfoide, como las placas de Peyer en el intestino delgado, que detectan y responden a antígenos, coordinando respuestas inmunológicas locales. Estas estructuras permiten al organismo distinguir entre alimentos inocuos y potenciales amenazas, activando mecanismos de defensa cuando es necesario (Ramiro et al., 2008).

Además, la microbiota intestinal juega un rol fundamental en la protección inmunológica. Los microorganismos que habitan el intestino no solo ayudan en la digestión y la fermentación de nutrientes, sino que también compiten con patógenos, evitando su colonización (Ramiro et al., 2008). La microbiota estimula el desarrollo y la maduración del sistema inmunológico, regulando la respuesta

inflamatoria y produciendo sustancias que fortalecen la barrera mucosa del intestino. Este equilibrio entre la microbiota y el sistema inmunológico es esencial para prevenir infecciones y mantener la integridad del tracto gastrointestinal.

En conjunto, estas interacciones entre el sistema digestivo y el sistema inmunológico son cruciales para la protección del organismo. La coordinación entre el GALT y la microbiota asegura que, además de extraer nutrientes, el tracto digestivo funcione como una barrera efectiva contra agentes patógenos, manteniendo la salud y el equilibrio general del organismo.

## Resumen

El sistema digestivo es fundamental para la transformación de los alimentos en nutrientes esenciales, asegurando el mantenimiento energético y metabólico del organismo. A lo largo del capítulo, se han abordado las estructuras anatómicas y funciones fisiológicas involucradas en este proceso, destacando las diferencias entre especies según sus necesidades alimenticias.

Se inició con una descripción general del sistema digestivo, desde la cavidad oral hasta el intestino grueso, destacando las adaptaciones estructurales y funcionales de órganos como el estómago e intestinos. Se analizaron los mecanismos de digestión mecánica y química, así como la regulación de la motilidad gastrointestinal y el papel de las secreciones digestivas en la absorción de macronutrientes.

Los órganos accesorios, como el hígado y el páncreas, desempeñan funciones clave en la digestión, regulando la emulsificación de grasas, la secreción de enzimas y la homeostasis metabólica. Se detallaron sus contribuciones a la producción de bilis, la secreción de insulina y glucagón, y su relación con el metabolismo general del organismo.

El capítulo también exploró las adaptaciones digestivas en diversas especies, como los rumiantes, equinos, aves y conejos, enfatizando las estrategias evolutivas que optimizan la digestión y el aprovechamiento de nutrientes según su dieta. Se destacó la importancia de la fermentación microbiana en rumiantes y la función del cecotrofismo en conejos como mecanismos de eficiencia nutricional.

Finalmente, se analizaron las interacciones del sistema digestivo con otros sistemas, incluyendo su regulación neuroendocrina y su papel en la inmunidad. La comunicación entre el sistema digestivo y el sistema nervioso central regula el apetito y la saciedad, mientras que el tejido linfático asociado al intestino (GALT) y la microbiota intestinal desempeñan un papel clave en la defensa inmunológica del organismo.

En conclusión, el sistema digestivo no solo garantiza la obtención y el procesamiento de los nutrientes, sino que también integra su funcionamiento con

el metabolismo general y la homeostasis, adaptándose a las necesidades específicas de cada especie para asegurar su supervivencia y bienestar.

El sistema digestivo no solo transforma y absorbe nutrientes, sino que también establece un vínculo esencial entre la energía disponible y los procesos que la requieren. No obstante, la producción de energía depende críticamente del aporte continuo de oxígeno y de la eliminación eficiente de dióxido de carbono. Esta conexión entre metabolismo y ventilación abre paso al estudio del sistema respiratorio, cuya función es indispensable para que las células utilicen los nutrientes suministrados por el aparato digestivo.

## Actividades

### 1. Comprensión General del Sistema Digestivo

- a) ¿Qué es el sistema digestivo y cuál es su papel en la transformación de los alimentos en nutrientes esenciales?

---

---

- b) Explica las cuatro fases del proceso digestivo y cómo cada una contribuye al equilibrio metabólico del organismo.

---

---

- c) ¿Cómo influyen el pH y la motilidad en la eficacia de la digestión y absorción de los nutrientes?

---

---

- d) Explica la diferencia entre digestión mecánica y digestión química, y da ejemplos en distintas especies.

---

---

## 2. Integración del Sistema Digestivo con Otros Sistemas

- a) ¿Cómo se coordinan los mecanismos nerviosos y hormonales para regular la función digestiva? Menciona ejemplos como el sistema nervioso entérico y hormonas digestivas (gastrina, secretina, colecistocinina).

---

---

- b) Explica la interacción entre el hígado, el páncreas y el intestino delgado en la digestión de lípidos.

---

---

- c) ¿Cuál es el papel de la microbiota intestinal en la digestión y en la regulación de la respuesta inmune del tracto gastrointestinal?

---

---

- d) Describe un escenario en el que una alteración en la función digestiva (como una disminución en la secreción enzimática o un trastorno en la motilidad) afecte otros sistemas fisiológicos.

---

---

### **3. Aplicaciones Clínicas**

- a) Considera el caso de un perro con insuficiencia pancreática exocrina: ¿qué procesos digestivos se ven afectados y qué estrategias terapéuticas podrían aplicarse?

---

---

---

- b) ¿Cuáles serían las consecuencias clínicas de una insuficiencia en la producción de bilis y cómo se manejaría en la práctica veterinaria?

---

---

---

- c) ¿Por qué ciertos animales han desarrollado sistemas digestivos compartimentados, y de qué manera estas adaptaciones influyen en su metabolismo?

---

---

---

- d) Explica cómo un desajuste en la motilidad gastrointestinal puede generar trastornos como el íleo. Proporciona ejemplos clínicos y posibles tratamientos.

---

---

## Taller

1. **Regulación de la Digestión y Motilidad:** En equipos, elaboren un mapa conceptual que explique la regulación de la digestión y motilidad gastrointestinal. Incluyan el papel del sistema nervioso entérico, las hormonas digestivas (gastrina, secretina, colecistocinina, etc.) y los reflejos nerviosos que controlan la secreción y el tránsito del alimento.
2. **Coordinación del Hígado y Páncreas en la Digestión:** Analicen cómo el hígado y el páncreas contribuyen a la digestión de macronutrientes. Expliquen su función en la secreción de bilis y enzimas digestivas, y cómo responden a las señales hormonales e intestinales para optimizar la absorción de nutrientes.
3. **Factores que Influyen en la Absorción de Nutrientes:** Discutan en grupos qué factores fisiológicos pueden afectar la absorción de nutrientes en el intestino delgado. Consideren el papel de la superficie de absorción, la motilidad intestinal, las enzimas digestivas y el flujo sanguíneo en la eficiencia del proceso.

## Glosario

1. **Ingestión:** Proceso inicial en el cual el alimento es captado y llevado a la boca, regulado por señales neurológicas y hormonales que determinan la sensación de hambre y saciedad.
2. **Digestión Mecánica:** Acción física que reduce el tamaño del alimento mediante la masticación y mezcla, facilitando la posterior acción de las enzimas digestivas.
3. **Digestión Química:** Proceso en el que enzimas y jugos digestivos descomponen las macromoléculas (carbohidratos, proteínas y lípidos) en componentes más simples, listos para su absorción.
4. **Bolo Alimenticio:** Masa de alimento masticado y mezclado con saliva que se forma en la cavidad oral y se transporta a través del esófago hacia el estómago.
5. **Amilasa Salival (Ptialina):** Enzima presente en la saliva que inicia la degradación del almidón en dextrinas y maltosa, marcando el comienzo de la digestión química de los carbohidratos.
6. **Mucinas:** Glicoproteínas que confieren a la saliva su consistencia viscosa, facilitando la lubricación del bolo alimenticio y protegiendo la mucosa oral de daños e irritaciones.
7. **Deglución:** Proceso por el cual el alimento es transportado de la cavidad oral al esófago, iniciándose de forma voluntaria y continuando de manera involuntaria mediante reflejos que aseguran un tránsito seguro.
8. **Peristalsis:** Movimiento ondulatorio de contracciones musculares que impulsa el alimento a lo largo del esófago y del tracto gastrointestinal, facilitado por el sistema nervioso central y entérico.
9. **Ácido Clorhídrico:** Sustancia producida en el estómago que desnaturaliza las proteínas y activa enzimas digestivas, como la pepsina.

10. **Pepsina:** Enzima gástrica que inicia la digestión de las proteínas al degradarlas en péptidos, esencial para la transformación química de estos macronutrientes.
11. **Vellosidades y Microvellosidades:** Proyecciones de la mucosa intestinal que aumentan considerablemente la superficie de absorción, facilitando el paso de nutrientes a la circulación.
12. **Enzimas Pancreáticas:** Conjunto de enzimas liberadas por el páncreas (amilasa, lipasa, tripsina y quimotripsina) que continúan la digestión de macronutrientes en el intestino delgado.
13. **Bilis:** Líquido producido por el hígado y almacenado en la vesícula biliar, que emulsiona las grasas para facilitar su digestión por la lipasa pancreática.
14. **Sistema Nervioso Entérico:** Red de neuronas localizada en el tracto gastrointestinal que regula la motilidad, la secreción y la absorción, operando de manera autónoma pero en coordinación con el sistema nervioso central.
15. **Fermentación:** Proceso llevado a cabo por la microbiota intestinal en el intestino grueso, que descompone las fibras vegetales en ácidos grasos volátiles y sintetiza vitaminas, aportando energía adicional especialmente en animales herbívoros.
16. **Rumia:** Proceso exclusivo de los rumiantes en el cual el alimento parcialmente digerido en el rumen es regurgitado, remasticado y reingerido. Este proceso aumenta la superficie del alimento, facilitando su fermentación microbiana y la digestión de fibras vegetales complejas.
17. **Eructo:** Mecanismo en el que los rumiantes expulsan los gases generados durante la fermentación microbiana en el rumen (principalmente dióxido de carbono y metano), previniendo la acumulación de presión que podría afectar la motilidad y la eficacia digestiva.
18. **Buche:** Estructura presente en algunas aves que actúa como reservorio temporal, permitiendo almacenar y ablandar el alimento antes de que éste continúe su tránsito hacia las secciones especializadas del sistema digestivo.

19. **Proventrículo:** Región glandular en el sistema digestivo de las aves donde se secretan enzimas digestivas que inician la degradación química del alimento, preparando el contenido para su procesamiento en la molleja.
20. **Molleja:** Órgano muscular de las aves encargado de triturar mecánicamente el alimento, compensando la ausencia de dientes. La molleja, a menudo asistida por gránulos o piedras ingeridas, descompone físicamente el alimento para facilitar la acción enzimática en etapas posteriores.

## **CAPITULO III**

Sistema Respiratorio

## **Sistema Respiratorio**

En continuidad con el capítulo anterior, el sistema respiratorio garantiza el intercambio gaseoso necesario para que los nutrientes absorbidos puedan ser oxidados y convertir su energía química en energía utilizable para los tejidos. Este sistema complementa de manera directa la función digestiva, ya que oxígeno y sustratos metabólicos actúan de forma conjunta en la bioenergética celular. Analizar su organización y regulación permite comprender múltiples procesos fisiológicos y clínicos relevantes en especies veterinarias.

### **Introducción**

El sistema respiratorio es esencial para la vida, ya que permite el intercambio de gases entre el organismo y el medio externo, asegurando así el suministro de oxígeno ( $O_2$ ) a los tejidos y la eliminación del dióxido de carbono ( $CO_2$ ), un producto residual del metabolismo celular. Este proceso, conocido como hematosis, constituye una función vital para la homeostasis, ya que el oxígeno es necesario para la producción de energía en las mitocondrias, mientras que el  $CO_2$  debe ser removido para evitar su acumulación y el desarrollo de acidosis respiratoria (Dezube, 2023).

Más allá de la hematosis, el sistema respiratorio desempeña roles fisiológicos adicionales de gran importancia en los animales domésticos. Entre ellos se destacan la regulación del equilibrio ácido-base mediante el control de la presión parcial de  $CO_2$ , la termorregulación (especialmente en especies que no poseen glándulas sudoríparas funcionales como los perros) y la filtración y defensa inmunológica del tracto respiratorio mediante estructuras mucociliares y células del sistema inmune (Tonozzi, 2021). Además, en varias especies, también participa en la fonación, la

percepción olfativa y la modulación del volumen torácico en relación con el sistema cardiovascular (Carvalho & Gonçalves, 2011).

Desde una perspectiva comparada, las estructuras anatómicas y fisiológicas del sistema respiratorio varían notablemente entre especies, como reflejo de adaptaciones evolutivas a distintos ambientes y requerimientos metabólicos. Por ejemplo, los mamíferos presentan pulmones esponjosos, altamente vascularizados y compuestos por millones de alvéolos que optimizan la superficie para el intercambio gaseoso. En contraste, las aves han desarrollado un sistema de ventilación unidireccional que incluye pulmones parabronquiales rígidos y sacos aéreos expansibles, permitiendo una extracción de oxígeno mucho más eficiente que en los mamíferos, incluso durante el vuelo a grandes altitudes (Figuerola, 2004).

Asimismo, los reptiles presentan pulmones saculares menos eficientes, aunque adecuados para su metabolismo reducido, y muchos anfibios complementan su respiración pulmonar con intercambio cutáneo. En el caso de los peces, el sistema respiratorio está representado por branquias especializadas que realizan un intercambio de gases en el medio acuático utilizando un mecanismo de flujo a contracorriente (Figuerola, 2004).

Este capítulo aborda de forma detallada la fisiología del sistema respiratorio con énfasis en las especies domésticas. Se explorarán los mecanismos de ventilación pulmonar, el intercambio gaseoso alveolo-capilar, el transporte de gases en la sangre y la regulación neural y química de la respiración. Además, se analizarán las diferencias fisiológicas más relevantes entre especies, así como ejemplos clínicos veterinarios que ilustran la importancia de estos conceptos en el diagnóstico y tratamiento de alteraciones respiratorias, integrando también su interacción con otros sistemas como el cardiovascular, el nervioso y el metabólico.

## Objetivos

- Describir la estructura y función del sistema respiratorio y su rol en el intercambio gaseoso.
- Analizar los procesos de ventilación y el intercambio de gases en los alvéolos.
- Explicar su función en el equilibrio ácido-base y la regulación metabólica.
- Identificar los mecanismos de control de la respiración.
- Comparar adaptaciones fisiológicas del sistema respiratorio en diversas especies y ambientes.

## Preguntas de Enfoque

1. ¿Cómo generan los pulmones y la caja torácica los cambios de presión necesarios para la entrada y salida de aire durante la respiración?
2. ¿De qué manera el oxígeno y el dióxido de carbono se intercambian eficientemente en los alvéolos pulmonares y cómo son transportados por la sangre hacia y desde los tejidos?
3. ¿Qué mecanismos fisiológicos regulan la frecuencia y profundidad respiratoria en reposo y ante diferentes condiciones (ejercicio, altitud, enfermedad)?
4. ¿Qué variaciones anatómico-fisiológicas existen en el sistema respiratorio de las distintas especies domésticas y cómo influyen en su función respiratoria y susceptibilidad a ciertas patologías?

## Generalidades del sistema respiratorio y organización funcional

El sistema respiratorio es una unidad funcional esencial para la vida animal, encargada de mantener la homeostasis mediante el suministro de oxígeno ( $O_2$ ) y la eliminación de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), subproducto del metabolismo celular. Además de su papel en el intercambio gaseoso, también participa en la regulación ácido-base, la termorregulación, la defensa inmunológica y, en algunas especies, en la fonación y la percepción olfativa (Dezube, 2023).

Este sistema se encuentra organizado en vías respiratorias superiores e inferiores, seguidas por los pulmones, donde ocurre el intercambio gaseoso. La pleura, membrana serosa que recubre los pulmones y la cavidad torácica, permite el deslizamiento sin fricción durante la respiración.

La fisiología respiratoria depende de tres principios clave:

- La existencia de una superficie alveolar extensa y bien profundida.
- La presencia de una barrera alveolo-capilar delgada y permeable.
- Y una relación eficiente entre ventilación y perfusión pulmonar (V/Q).

Estas características aseguran un intercambio gaseoso óptimo en los mamíferos y otras especies domésticas (Maina & Schachner, 2025).

### **Vías respiratorias superiores**

Las vías respiratorias superiores incluyen la nariz, cavidades nasales, faringe y laringe. Estas estructuras no solo conducen el aire, sino que también cumplen funciones de acondicionamiento, filtración y defensa (Carvalho & Gonçalves, 2011).

- En la cavidad nasal, el aire se filtra mediante vibras y se humedece gracias al epitelio ciliado con células caliciformes. Además, los cornetes nasales aumentan la superficie de contacto y permiten una termorregulación eficaz mediante intercambio de calor (Maina & Schachner, 2025).
- La faringe sirve como vía compartida entre el sistema digestivo y el respiratorio.
- La laringe, además de contener las cuerdas vocales, participa en la fonación y en la protección de las vías inferiores durante la deglución mediante la acción de la epiglotis.

Estas estructuras, al generar resistencia controlada al flujo de aire, también participan en el mantenimiento de la presión intratorácica necesaria para la inspiración.

La Figura 16 ilustra de manera secuencial el recorrido que sigue el aire desde su ingreso por las vías respiratorias superiores hasta alcanzar los alvéolos pulmonares, donde ocurre el intercambio gaseoso. Esta representación gráfica facilita la comprensión del tránsito del flujo aéreo a través de estructuras clave como la faringe, laringe, tráquea y bronquiolos, destacando la organización funcional del sistema respiratorio y la importancia de cada segmento en la conducción, filtración y acondicionamiento del aire inspirado.



**Figura 16.** Ruta del Aire a Través del Sistema Respiratorio

**Fuente:** Elaboración propia

La Tabla 12 presenta una comparación clara entre las vías respiratorias superiores e inferiores, resaltando sus diferencias estructurales y funcionales dentro del proceso respiratorio. Esta clasificación permite identificar cómo cada grupo de vías participa de manera complementaria en la conducción del aire, su acondicionamiento, la protección frente a partículas externas y la regulación de la ventilación, proporcionando una visión integral del sistema respiratorio y de la fisiología implicada en la respiración eficiente.

**Tabla 12.** Comparación entre Vías Respiratorias Superiores e Inferiores

| Vías Respiratorias Superiores                                                                   | Vías Respiratorias Inferiores                                                                                                |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Incluyen la nariz, cavidad nasal, faringe y laringe.                                            | Incluyen la tráquea, bronquios, bronquiolos y alvéolos.                                                                      |
| Filtran, calientan y humidifican el aire antes de que ingrese a los pulmones.                   | Permiten la conducción del aire y el intercambio gaseoso en los pulmones.                                                    |
| Contienen estructuras como los pelos y el moco nasal, que atrapan partículas y microorganismos. | Poseen células especializadas como los neumocitos tipo I y II, que facilitan el intercambio de gases y producen surfactante. |
| Regulan el flujo de aire mediante la laringe y las cuerdas vocales.                             | La ventilación es regulada por la presión intrapulmonar e intrapleural.                                                      |

**Fuente:** Adaptado de Colegio Oficial de Barcelona (2015)

## **Vías respiratorias inferiores**

La tráquea conduce el aire a través del cuello y tórax hasta los bronquios. Está reforzada por anillos cartilaginosos incompletos en forma de "C" que previenen el colapso luminal, y recubierta por un epitelio ciliado que desplaza moco hacia la faringe.

Los bronquios se ramifican en bronquios secundarios y terciarios, formando el árbol bronquial. En los bronquiolos, el cartílago desaparece y aparece músculo liso, lo que permite una regulación fina del flujo de aire mediante broncoconstricción o broncodilatación (Colegio Oficial de Barcelona, 2015).

En especies como los caballos, la rigidez bronquial limita la distensibilidad pulmonar pero permite grandes volúmenes de aire por ciclo respiratorio. En rumiantes y porcinos, la alta lobulación pulmonar se asocia con una segmentación funcional pronunciada, pero también con menor volumen corriente proporcional (Muriel et al., 2022).

## **Pulmones y parénquima pulmonar**

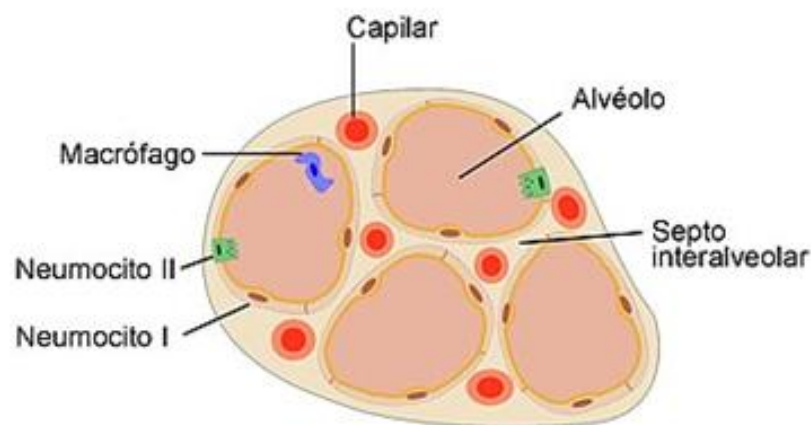
Los pulmones son órganos esponjosos, con lóbulos bien definidos en algunas especies (bovinos, porcinos) y más difusos en otras (caballos). En su interior se encuentran los alvéolos pulmonares, estructuras saculares revestidas por neumocitos tipo I, que forman la barrera delgada para la difusión de gases, y neumocitos tipo II, que secretan surfactante pulmonar (Azucas, 2023).

El surfactante, una mezcla de fosfolípidos y proteínas, reduce la tensión superficial del fluido alveolar, evitando el colapso (atelectasia) al final de la espiración, y facilitando la apertura de los alvéolos en la inspiración (Azucas, 2023).

Tras comprender la organización de las vías respiratorias superiores e inferiores y su papel en la conducción y acondicionamiento del aire, es fundamental adentrarse en la estructura microscópica donde ocurre el intercambio gaseoso: el alvéolo pulmonar. Estas unidades funcionales representan el punto final del árbol

respiratorio y constituyen el principal sitio de difusión de oxígeno y dióxido de carbono entre el aire y la sangre. Su arquitectura altamente especializada, caracterizada por una pared extremadamente delgada, un rico entramado capilar y la presencia de neumocitos tipo I y tipo II, garantiza una superficie amplia y eficiente para la respiración. A continuación, se presenta la estructura del alvéolo pulmonar, elemento clave para entender los mecanismos que regulan la ventilación y la fisiología respiratoria en animales domésticos.

La Figura 17 muestra de manera esquemática la organización microscópica del alvéolo pulmonar, destacando los componentes celulares y vasculares que participan directamente en el intercambio gaseoso. Esta representación permite identificar la delgada barrera alveolocapilar, la distribución de neumocitos tipo I y tipo II, la presencia de macrófagos alveolares y la red capilar que rodea la unidad respiratoria. Visualizar estos elementos facilita comprender cómo la arquitectura del alvéolo está optimizada para maximizar la difusión de gases, mantener la integridad funcional del tejido pulmonar y asegurar una ventilación eficiente en los animales domésticos.



**Figura 17.** Estructura del alvéolo pulmonar

**Fuente:** Rivera (2022)

## **Pleura y espacio pleural**

La pleura está conformada por dos hojas:

- **Pleura visceral**, adherida al pulmón.
- **Pleura parietal**, unida a la cavidad torácica.

Entre ambas existe el espacio pleural, que contiene una mínima cantidad de líquido pleural con función lubricante. La presión intrapleural normalmente es negativa (alrededor de  $-5 \text{ cmH}_2\text{O}$  en reposo), lo que permite que los pulmones permanezcan expandidos y sigan los movimientos de la caja torácica durante la ventilación (Suárez et al., 2012).

Cuando esta presión se altera, como en el neumotórax, el pulmón puede colapsar por la pérdida del gradiente de presión, provocando disnea severa y requerimiento de intervención clínica inmediata (Suárez et al., 2012).

## **Fisiología Respiratoria: Procesos y Regulación**

La fisiología respiratoria aborda el estudio de los mecanismos que permiten la captación de oxígeno ( $\text{O}_2$ ) y la eliminación de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) del organismo, ambos procesos esenciales para mantener el metabolismo celular y la homeostasis corporal (Dominelli & Sheel, 2024). Este sistema complejo opera en diversas etapas secuenciales, comenzando con la ventilación pulmonar, seguida por el intercambio gaseoso, el transporte de gases en sangre y culminando en la regulación mediante controles neurales, químicos y hormonales. Este capítulo explorará a fondo estos procesos, integrando conceptos fundamentales como el surfactante pulmonar, la organización de los centros respiratorios y la ley de difusión de Fick.

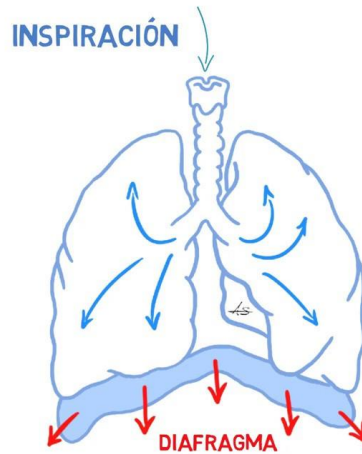
## **Mecánica de la Ventilación Pulmonar**

La ventilación pulmonar es un proceso dinámico en el cual el aire fluye hacia dentro y fuera de los pulmones, permitiendo que el intercambio gaseoso se realice eficientemente (Madelaine et al., 2022). Se compone principalmente de dos fases: la inspiración y la espiración.

### **a) Inspiración**

La inspiración es una fase activa que depende fundamentalmente de la contracción del músculo diafragma, que desciende, aumentando así el volumen de la cavidad torácica. Adicionalmente, los músculos intercostales externos se contraen, elevando las costillas y expandiendo aún más el tórax. En situaciones de alta demanda ventilatoria, como durante el ejercicio intenso, participan músculos accesorios como los escalenos y esternocleidomastoideos, aumentando la capacidad de expansión torácica (Dominelli & Sheel, 2024). Este aumento volumétrico genera una presión intrapulmonar inferior a la presión atmosférica, lo que provoca la entrada de aire rico en oxígeno hacia los pulmones.

La Figura 18 ilustra el mecanismo de la inspiración, resaltando el descenso del diafragma y la expansión torácica que generan una presión intratorácica negativa. Esta representación facilita comprender cómo la acción coordinada del diafragma y los músculos intercostales permite el ingreso de aire a los pulmones durante la fase activa de la ventilación.



**Figura 18.** Mecanismo de la inspiración: acción del diafragma

**Fuente:** Nursing heart in ICU (2021)

b) **Espiración**

En reposo, la espiración es un proceso predominantemente pasivo, resultado de la relajación del diafragma y músculos intercostales externos, acompañado por el retroceso elástico natural de los pulmones y la pared torácica, que reduce el volumen torácico aumentando así la presión intrapulmonar, forzando la salida del aire. Sin embargo, en situaciones que requieren una ventilación más energética, como en el ejercicio o ciertas patologías respiratorias obstructivas, la espiración se convierte en un proceso activo donde intervienen los músculos intercostales internos y abdominales, facilitando una expulsión más completa del aire pulmonar (Torres, 2023).

La Figura 19 muestra el proceso de espiración, caracterizado por la relajación del diafragma y el retroceso elástico del pulmón y la caja torácica. Este esquema permite visualizar cómo el aumento de la presión intratorácica favorece la expulsión del aire, especialmente en condiciones de ventilación pasiva en reposo.



**Figura 19.** Mecanismo de la espiración: relajación del diafragma y salida del aire

**Fuente:** Nursing heart in ICU (2021)

### **Presión Intrapulmonar e Intrapleural**

La ventilación pulmonar depende críticamente de las diferencias de presión entre el interior de los pulmones y el ambiente externo. Durante la inspiración, la expansión de la cavidad torácica genera un descenso en la presión intrapulmonar por debajo de la presión atmosférica, permitiendo así la entrada de aire hacia los alvéolos. A la inversa, durante la espiración, la presión intrapulmonar aumenta ligeramente, favoreciendo la salida de aire (Torres, 2023).

La presión intrapleural, localizada en el espacio entre la pleura visceral y parietal, es normalmente negativa respecto a la presión atmosférica en mamíferos domésticos. Este gradiente de presión actúa como un "pegamento" fisiológico que mantiene adheridos los pulmones a la pared torácica.

En condiciones normales, los valores aproximados en animales oscilan entre:

- -2 a -5 cmH<sub>2</sub>O en reposo,
- Descendiendo hasta aproximadamente -8 a -10 cmH<sub>2</sub>O durante una inspiración profunda, especialmente en especies grandes como caballos o bovinos.

Esta presión negativa cumple funciones fundamentales:

- Facilitar la expansión pulmonar en respuesta al aumento del volumen torácico.
- Prevenir el colapso pulmonar durante la espiración pasiva.
- Contrarrestar las fuerzas de retracción elástica tanto de los pulmones como de la pared torácica.

Alteraciones de la presión intrapleural, como en un neumotórax (entrada de aire al espacio pleural) o derrame pleural (acumulación de líquido), afectan la mecánica ventilatoria normal y pueden llevar al colapso pulmonar parcial o completo (Torres, 2023).

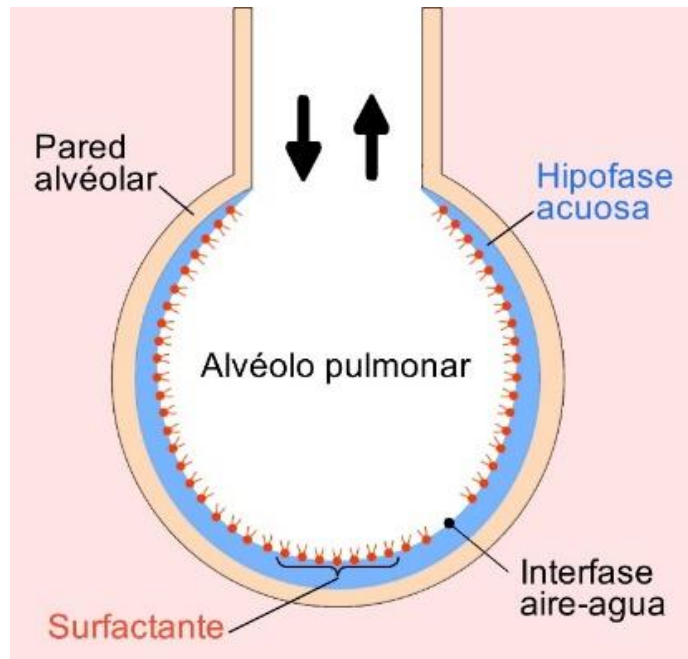
### **Factores que Afectan la Ventilación**

La ventilación eficaz puede verse influenciada por diversos factores anatómicos y fisiológicos, entre ellos:

1. **Compliance Pulmonar:** La capacidad de los pulmones para expandirse en respuesta a cambios de presión. Una alta compliance facilita la expansión pulmonar, mientras que una baja compliance, como en casos de fibrosis o edema, dificulta la ventilación (Torres, 2023).
2. **Resistencia de las Vías Aéreas:** Factores como la broncoconstricción o la inflamación pueden aumentar la resistencia al flujo de aire, reduciendo la eficiencia ventilatoria (Torres, 2023).
3. **Tensión Superficial y Surfactante Pulmonar:** Los alvéolos tienen una tendencia natural a colapsar debido a la tensión superficial del líquido que recubre su interior. El surfactante pulmonar, producido por los neumocitos tipo II, es una mezcla de lípidos y proteínas que reduce esta tensión superficial, facilitando la expansión de los alvéolos durante la inspiración y evitando su colapso en la espiración (Torres, 2023).

La Figura 20 representa la acción del surfactante pulmonar en la superficie del alvéolo, destacando su papel esencial en la reducción de la tensión superficial

en la interfaz aire-líquido. Este esquema facilita comprender cómo la capa de surfactante evita el colapso alveolar durante la espiración y disminuye el esfuerzo necesario para la expansión pulmonar en la inspiración, contribuyendo de manera decisiva a la estabilidad y eficiencia de la ventilación.



**Figura 20.** Acción del surfactante pulmonar en el alvéolo: reducción de la tensión superficial en la interfaz aire-agua

**Fuente:** Piiper (1982)

4. **Trabajo Respiratorio:** Es la energía requerida para la ventilación, incluyendo la superación de la resistencia de las vías aéreas y la elasticidad pulmonar y torácica. Enfermedades que aumentan la rigidez pulmonar (como la fibrosis) o la resistencia al flujo aéreo (como el asma) incrementan el trabajo respiratorio, lo que puede generar fatiga muscular y dificultad para respirar (Patel, 2024).

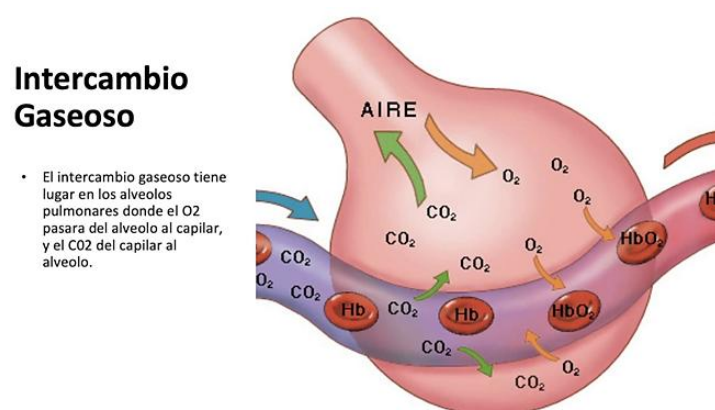
## Intercambio Gaseoso en los Pulmones y Tejidos

Comprendida la dinámica mecánica que permite el ingreso de aire, es fundamental analizar cómo ese aire llega a los alvéolos y se renueva adecuadamente para permitir el intercambio gaseoso.

El intercambio gaseoso es el proceso mediante el cual el oxígeno ( $O_2$ ) es transportado desde el aire inhalado hasta la sangre, mientras que el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), producto del metabolismo celular, se elimina del organismo (Dezube, 2023). Este intercambio ocurre principalmente en los alvéolos pulmonares y en los capilares de los tejidos, dependiendo de gradientes de presión y características fisiológicas de la membrana alveolocapilar.

La Figura 21 ilustra el proceso de intercambio gaseoso alveolocapilar, mostrando la difusión simultánea de oxígeno hacia la sangre y de dióxido de carbono hacia el alvéolo. Esta representación gráfica ayuda a visualizar cómo los gradientes de presión parcial y la delgada membrana alveolocapilar permiten un intercambio rápido y eficiente de gases, proceso fundamental para mantener la oxigenación tisular y eliminar los productos del metabolismo celular

### Principios del Intercambio Gaseoso



**Figura 21.** Intercambio gaseoso alveolocapilar: difusión de  $O_2$  y  $CO_2$  entre el alvéolo y los capilares pulmonares

**Fuente:** Mendoza (2016)

El intercambio de gases en los pulmones y tejidos está gobernado por leyes físicas, entre ellas la Ley de Difusión de Fick, que establece que la velocidad de difusión de un gas es directamente proporcional a la superficie disponible y a la diferencia de presión parcial del gas, e inversamente proporcional al grosor de la membrana a través de la cual se difunde (Dezube, 2023).

### **Ley de Fick aplicada a la fisiología pulmonar**

El proceso de intercambio gaseoso entre los alvéolos y los capilares pulmonares sigue los principios establecidos por la Ley de Fick, que describe cómo un gas difunde a través de una membrana biológica. En fisiología respiratoria animal, esta ley es fundamental porque explica por qué el oxígeno ( $O_2$ ) y el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) pueden moverse rápida y eficientemente entre el aire alveolar y la sangre. Según esta ley, la velocidad de difusión ( $V$ ) de un gas depende de tres principios fisiológicos esenciales:

#### **1. El intercambio gaseoso aumenta con la ampliación del área de superficie disponible (A)**

Cuanto mayor es el área total en la que un gas puede difundirse, mayor será la cantidad de gas que atraviesa la membrana por unidad de tiempo.

En animales domésticos, la estructura alveolar multiplica enormemente esta superficie:

- En un perro adulto, la superficie total de intercambio puede superar los 50-70 m<sup>2</sup>.
- En un caballo de 500 kg, la superficie alveolar puede llegar a 250 m<sup>2</sup>, optimizando la oxigenación durante ejercicio intenso.

La microarquitectura pulmonar (millones de alvéolos en mamíferos y parabronquios con capilares aéreos en aves) está diseñada para maximizar este principio (Andrade & Bertrand, 2022)

## **2. El intercambio gaseoso aumenta con la magnitud del gradiente de presión parcial ( $P_1 - P_2$ )**

La difusión ocurre desde una zona de mayor presión parcial hacia otra de menor presión.

Ejemplos fisiológicos:

### **Oxígeno:**

- $PO_2$  alveolar  $\approx 100$  mmHg
- $PO_2$  sangre venosa  $\approx 40$  mmHg  
→ Gradiente de  $\sim 60$  mmHg que impulsa el ingreso de  $O_2$  a la sangre.

### **Dióxido de carbono:**

- $PCO_2$  venosa  $\approx 46$  mmHg
- $PCO_2$  alveolar  $\approx 40$  mmHg  
→ Gradiente pequeño, pero suficiente gracias a la alta solubilidad del  $CO_2$ .

Este principio es clave para entender fenómenos como hipoventilación, ejercicio intenso o la aclimatación a la altura (Andrade & Bertrand, 2022).

## **3. El intercambio gaseoso disminuye cuando aumenta el grosor de la membrana (T)**

La membrana respiratoria es extremadamente delgada ( $\approx 0.2$ – $0.5 \mu m$ ), lo que permite una difusión eficiente.

Un aumento en su grosor disminuye la velocidad de difusión, incluso si el área y el gradiente de presión son adecuados.

Condiciones que aumentan el grosor fisiológico o transitoriamente:

- Edema pulmonar por ejercicio extremo en caballos (EIPH subclínico)
- Incremento de líquido intersticial en neonatos antes de la expansión pulmonar completa

- Aumento del grosor de la membrana en aves jóvenes antes de la maduración de parabronquios

### **Aplicación Fisiológica en Animales**

El diseño del pulmón en mamíferos domésticos (alvéolos) y aves (parabronquios + capilares aéreos) maximiza los tres principios de Fick mediante:

- Gran superficie total de intercambio (principio 1)
- Alto gradiente mantenido por la ventilación y la perfusión (principio 2)
- Membrana extremadamente delgada (principio 3)

En consecuencia, el intercambio gaseoso ocurre en menos de 0.25 segundos en animales sanos, incluso en especies atletas como caballos o galgos (Andrade & Bertrand, 2022).

### **Ecuación de Fick**

$$V = \frac{A \times D \times (P1 - P2)}{T}$$

Donde:

- **V** = Volumen de gas que difunde por unidad de tiempo
- **A** = Área de superficie disponible para el intercambio
- **D** = Coeficiente de difusión del gas
- **(P1 - P2)** = Diferencia de presión parcial del gas a través de la membrana
- **T** = Grosor de la membrana

En los pulmones, la alta superficie proporcionada por los millones de alvéolos y la delgada membrana alveolocapilar permiten una difusión rápida y eficiente de los gases (Andrade & Bertrand, 2022).

## Presión Parcial de Gases y Gradientes de Difusión

Cada gas en la mezcla de aire ejerce una presión parcial, y el intercambio gaseoso ocurre debido a diferencias en estas presiones parciales entre los alvéolos y la sangre (Levitzky, 2018).

La Tabla 13 resume los gradientes de presión parcial que impulsan el movimiento de oxígeno y dióxido de carbono entre los alvéolos y la sangre. Estos valores permiten visualizar de manera clara por qué el  $O_2$  difunde hacia el capilar pulmonar y el  $CO_2$  realiza el trayecto inverso. Al presentar las presiones de ambos gases en cada compartimento, la tabla facilita la comprensión de la dirección del flujo gaseoso en condiciones fisiológicas.

**Tabla 13.** Gradientes de Presión Parcial de Gases en el Intercambio Pulmonar

| Gas                                           | Presión parcial en aire (mmHg) | Presión parcial en sangre (mmHg) | Dirección de difusión   |
|-----------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| <b><math>O_2</math> (Oxígeno)</b>             | 100 mmHg                       | 40 mmHg                          | Del alvéolo a la sangre |
| <b><math>CO_2</math> (Dióxido de carbono)</b> | 40 mmHg                        | 46 mmHg                          | De la sangre al alvéolo |

**Fuente:** Adaptado de Andrade & Bertrand (2022)

El oxígeno se difunde desde los alvéolos hacia la sangre, donde la presión parcial de  $O_2$  es menor, mientras que el  $CO_2$  sigue el camino inverso, moviéndose desde la sangre hacia los alvéolos para ser eliminado con la espiración (Andrade & Bertrand, 2022).

## Factores que Afectan la Difusión Pulmonar

El intercambio gaseoso en los pulmones depende de múltiples factores fisiológicos y patológicos, los cuales pueden mejorar o disminuir la eficiencia de la difusión (Andrade & Bertrand, 2022).

La Tabla 14 organiza los principales factores anatómicos y funcionales que modulan la eficiencia de la difusión pulmonar. Al integrar elementos como el área de intercambio, el grosor de la membrana respiratoria y el tiempo de contacto sangre-alvéolo, esta tabla permite identificar cómo distintas condiciones fisiológicas o enfermedades pueden favorecer o limitar el intercambio gaseoso. Su inclusión brinda una visión global de los determinantes que regulan la capacidad pulmonar de oxigenación.

**Tabla 14.** Factores que Afectan la Difusión Gaseosa en los Pulmones

| <b>Factor</b>                               | <b>Efecto sobre la difusión gaseosa</b>                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Área de superficie de intercambio</b>    | Una mayor superficie alveolar aumenta la difusión. En enfermedades como el enfisema, la pérdida de alvéolos reduce el área disponible y compromete la oxigenación.                                                                                    |
| <b>Grosor de la membrana alveolocapilar</b> | Un aumento en el grosor de la membrana, como ocurre en la fibrosis pulmonar o en el edema pulmonar, dificulta la difusión de los gases.                                                                                                               |
| <b>Gradientes de presión parcial</b>        | Diferencias mayores de presión parcial aumentan la difusión. En altitudes elevadas, la menor presión parcial de oxígeno en el aire reduce la eficacia del intercambio.                                                                                |
| <b>Coefficiente de difusión del gas</b>     | Depende de la solubilidad y del peso molecular del gas. El CO <sub>2</sub> difunde 20 veces más rápido que el O <sub>2</sub> , lo que explica por qué la eliminación de CO <sub>2</sub> no suele ser un problema, incluso en enfermedades pulmonares. |
| <b>Tiempo de contacto sangre-alvéolo</b>    | En reposo, la sangre capilar pulmonar tiene suficiente tiempo para oxigenarse. Sin embargo, en ejercicio extremo o enfermedades como insuficiencia cardíaca, este tiempo se reduce, afectando la oxigenación.                                         |

**Fuente:** Adaptado de Andrade & Bertrand (2022)

## Intercambio Gaseoso en los Tejidos

El proceso de intercambio gaseoso continúa a nivel tisular, donde el oxígeno se disocia de la hemoglobina en respuesta a gradientes de presión y a condiciones locales de los tejidos. Simultáneamente, el CO<sub>2</sub> producido por el metabolismo celular se difunde hacia la sangre y es transportado a los pulmones para su eliminación (Andrade & Bertrand, 2022).

Además del gradiente de presión parcial, existen mecanismos locales que regulan de manera precisa el intercambio gaseoso en los tejidos. Entre estos destaca la vasodilatación inducida por metabolitos locales como el dióxido de carbono, el ácido láctico y el adenosín trifosfato (ATP), especialmente en tejidos con alta actividad metabólica, como el músculo esquelético durante el ejercicio. Estos factores locales incrementan el flujo sanguíneo hacia áreas específicas, optimizando la disponibilidad de oxígeno y mejorando la eliminación efectiva del CO<sub>2</sub> (Madelaire et al., 2022).

Asimismo, la modulación del intercambio gaseoso también está mediada por la actividad del sistema nervioso autónomo. En situaciones de estrés, la estimulación simpática induce vasoconstricción periférica generalizada, pero se acompaña de una vasodilatación selectiva en órganos vitales como el corazón, cerebro y músculos activos. Esta redistribución del flujo sanguíneo asegura que el intercambio gaseoso tisular sea altamente eficiente, cubriendo así las necesidades metabólicas específicas según las circunstancias fisiológicas del organismo (White, 2024).

## **Mecanismos de Adaptación al Intercambio Gaseoso**

El intercambio gaseoso es un proceso fundamental para la homeostasis y el metabolismo de los organismos aeróbicos. Sin embargo, diversos factores ambientales, metabólicos y fisiológicos pueden afectar su eficiencia. Para compensar estas variaciones, los organismos han desarrollado mecanismos de adaptación que optimizan la captación, transporte y entrega de oxígeno, así como la eliminación de dióxido de carbono (Piiper, 1982; White, 2024).

### **1. Adaptaciones a la Hipoxia Crónica**

Cuando los organismos se exponen a condiciones de baja disponibilidad de oxígeno, como ocurre en altitudes elevadas o en patologías pulmonares, activan respuestas fisiológicas y bioquímicas para mejorar la oxigenación tisular.

- **Aumento de la producción de eritropoyetina (EPO):** En hipoxia crónica, los riñones liberan más eritropoyetina, estimulando la eritropoyesis en la médula ósea. Como resultado, aumenta el número de eritrocitos y la capacidad de transporte de oxígeno en la sangre (Calderón, 2025).
- **Mayor concentración de hemoglobina:** Algunos mamíferos adaptados a la altura, como los camélidos, presentan hemoglobina con mayor afinidad por el oxígeno, lo que permite una captación más eficiente en condiciones de baja presión parcial de  $O_2$  (Calderón, 2025).
- **Aumento en la capilarización de los tejidos:** La hipoxia induce angiogénesis, promoviendo la formación de nuevos capilares que mejoran la difusión de oxígeno a los tejidos (Charris, 2021).
- **Cambios en la ventilación pulmonar:** La hiperventilación inducida por hipoxia aumenta la eliminación de  $CO_2$ , lo que ayuda a contrarrestar la acidosis respiratoria (Calderón, 2025).

## 2. Adaptaciones al Aumento de la Demanda Metabólica

En situaciones de alta demanda energética, como el ejercicio intenso o el metabolismo acelerado en ciertos animales, el organismo optimiza la entrega de oxígeno y la eliminación de  $CO_2$ .

- **Efecto Bohr:** En tejidos con alta actividad metabólica, el incremento de la concentración de  $CO_2$  y la disminución del pH disminuyen la afinidad de la hemoglobina por el oxígeno, favoreciendo su liberación en los tejidos donde más se necesita (Saavedra et al., 2022).
- **Efecto Haldane:** En los pulmones, la unión del oxígeno a la hemoglobina facilita la liberación del  $CO_2$ , promoviendo su eliminación eficiente (Saavedra et al., 2022).
- **Mayor flujo sanguíneo a tejidos activos:** Durante el ejercicio, la redistribución del flujo sanguíneo aumenta la perfusión en músculos activos

y disminuye en órganos con menor demanda en ese momento (Oviedo & Garcés, 2017).

- **Incremento en la actividad de la anhidrasa carbónica:** Esta enzima acelera la conversión de  $\text{CO}_2$  en ácido carbónico y bicarbonato en los tejidos, permitiendo un transporte más eficiente del  $\text{CO}_2$  hacia los pulmones, donde es exhalado (Saavedra et al., 2022).

### 3. Adaptaciones en Animales con Demandas Respiratorias Especiales

Diferentes especies han desarrollado mecanismos especializados para optimizar el intercambio gaseoso según sus necesidades ecológicas y fisiológicas.

- **Mamíferos marinos:** Animales como focas y ballenas poseen altos niveles de mioglobina en sus músculos, lo que les permite almacenar oxígeno para el buceo prolongado. Además, reducen su frecuencia cardíaca y redistribuyen el flujo sanguíneo hacia órganos vitales durante la inmersión (Noren & Williams, 2000).
- **Aves en vuelo:** El sistema respiratorio de las aves permite un flujo de aire unidireccional a través de los pulmones, optimizando el intercambio gaseoso incluso a grandes altitudes (Figueroa, 2004).
- **Reptiles y anfibios:** Algunas especies utilizan tanto pulmones como respiración cutánea para maximizar la captación de oxígeno en diferentes ambientes (Tattersall, 2007).
- **Peces:** Los peces óseos utilizan un sistema de intercambio a contracorriente en sus branquias, maximizando la extracción de oxígeno del agua, incluso cuando las concentraciones son bajas (Maina, 2014).

### 4. Adaptaciones al Estrés Térmico y la Termorregulación

El sistema respiratorio también desempeña un papel en la regulación de la temperatura corporal en diversas especies.

- **Jadeo en perros y aves:** Estos animales utilizan la evaporación de agua en las vías respiratorias para disipar calor.
- **Vasodilatación en tejidos periféricos:** En algunas especies, el aumento del flujo sanguíneo en la piel y mucosas favorece la pérdida de calor a través de la ventilación pulmonar.
- **Hibernación y metabolismo reducido:** Algunos mamíferos reducen su frecuencia respiratoria durante la hibernación para minimizar el gasto energético y conservar oxígeno en ambientes con baja disponibilidad (Pérez, 2013).

Para comprender cómo distintas especies logran mantener una oxigenación adecuada en condiciones ambientales extremas, resulta fundamental analizar los mecanismos fisiológicos que optimizan el intercambio gaseoso. Estas adaptaciones permiten mejorar la captación, transporte y utilización del oxígeno, ya sea en escenarios de hipoxia ambiental, altas demandas metabólicas o situaciones fisiológicas particulares como la inmersión o la hibernación. La siguiente tabla resume las principales estrategias adaptativas relacionadas con el intercambio gaseoso y ejemplifica su presencia en diferentes grupos animales.

**Tabla 15.** Mecanismos de Adaptación al Intercambio Gaseoso

| <b>Adaptación</b>                                         | <b>Mecanismo</b>                                                                                      | <b>Ejemplo de Especies</b>                        |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| <b>Aumento de eritropoyetina (EPO)</b>                    | Estimula la producción de eritrocitos en respuesta a la hipoxia                                       | Mamíferos en altitudes elevadas (llamas, vicuñas) |
| <b>Mayor afinidad de la hemoglobina por O<sub>2</sub></b> | Permite una mejor captación de oxígeno en ambientes de baja presión parcial                           | Camélidos, aves de montaña                        |
| <b>Efecto Bohr</b>                                        | La disminución del pH facilita la liberación de O <sub>2</sub> en los tejidos metabólicamente activos | Mamíferos terrestres y marinos                    |
| <b>Efecto Haldane</b>                                     | La oxigenación de la hemoglobina facilita la liberación de CO <sub>2</sub> en los pulmones            | Todos los vertebrados                             |

|                                             |                                                                                           |                                     |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Ventilación unidireccional</b>           | Optimiza el intercambio gaseoso al evitar la mezcla de aire fresco y aire exhalado        | Aves, cocodrilos                    |
| <b>Intercambio a contracorriente</b>        | Maximiza la extracción de oxígeno del agua                                                | Peces óseos, tiburones              |
| <b>Mioglobina elevada</b>                   | Almacena oxígeno en los músculos para periodos de apnea                                   | Mamíferos marinos (focas, ballenas) |
| <b>Jadeo</b>                                | Favorece la disipación de calor mediante la evaporación de agua en las vías respiratorias | Perros, aves                        |
| <b>Reducción de frecuencia respiratoria</b> | Disminuye el consumo de oxígeno durante hibernación                                       | Osos, murciélagos                   |

**Fuente:** Adaptado de Pérez (2013)

## Transporte de Gases en la Sangre

Una vez realizado el intercambio gaseoso en los alvéolos pulmonares, los gases respiratorios deben ser transportados a través del sistema circulatorio hacia los tejidos y desde ellos de regreso a los pulmones. Este transporte se lleva a cabo por mecanismos altamente eficientes que aseguran un abastecimiento constante de oxígeno a las células y una eliminación eficaz del CO<sub>2</sub>, producto del metabolismo celular (García, 1979).

### Transporte de Oxígeno

El oxígeno se transporta en la sangre de dos maneras principales:

1. **Disuelto en el plasma:** Una pequeña proporción (alrededor del 1.5%) del O<sub>2</sub> se disuelve directamente en el plasma. Aunque esta fracción es limitada, es esencial porque es la única forma que puede difundirse libremente hacia los tejidos.
2. **Unido a la hemoglobina:** La mayor parte del oxígeno (aproximadamente el 98.5%) se transporta unido a la hemoglobina (Hb), una proteína presente en los glóbulos rojos. Cada molécula de hemoglobina puede unirse a cuatro moléculas de oxígeno, formando la oxihemoglobina (HbO<sub>2</sub>) (Canet, 2006).

Esta unión es reversible y dependiente de la presión parcial de oxígeno ( $PO_2$ ), el pH, la temperatura y la concentración de  $CO_2$ .

### Curva de Disociación de la Hemoglobina

Describe la relación entre la saturación de hemoglobina y la presión parcial de oxígeno. Tiene una forma sigmoidea debido a la cooperación entre las subunidades de la hemoglobina: cuando una molécula de  $O_2$  se une, facilita la unión de las siguientes.

Factores como el pH (efecto Bohr), la temperatura y los niveles de  $CO_2$  modifican esta curva, promoviendo la liberación de oxígeno en tejidos activos (Martín, 1974).

La afinidad de la hemoglobina por el oxígeno no es constante, sino que varía según las condiciones fisiológicas del organismo. Factores como el pH, la temperatura, la concentración de  $CO_2$  y la presencia de compuestos moduladores alteran la forma en que la hemoglobina capta o libera  $O_2$ , ajustando la oxigenación de los tejidos según sus necesidades metabólicas. La siguiente tabla resume los principales elementos que desplazan la curva de disociación de la hemoglobina y explica cómo estos cambios favorecen la oxigenación en distintas situaciones fisiológicas.

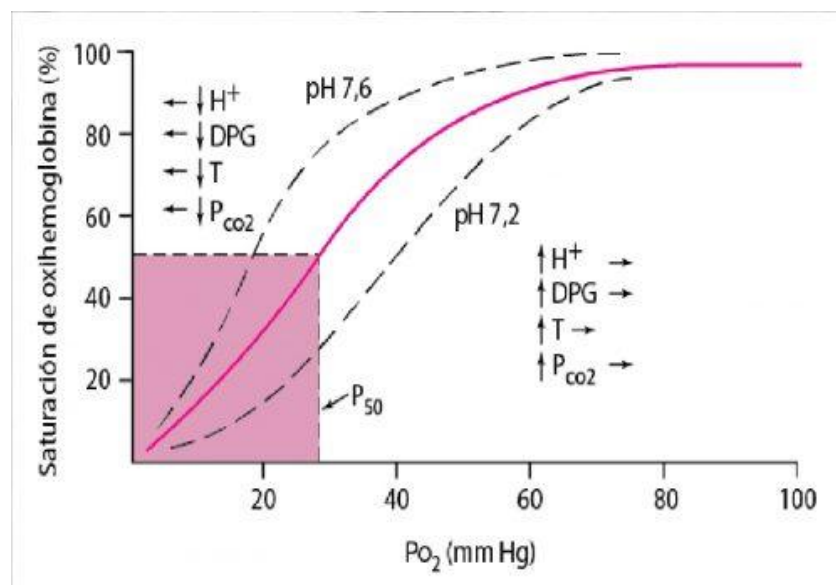
**Tabla 16.** Factores que Desplazan la Curva de Disociación de la Hemoglobina

| Condición                                         | Desplazamiento de la curva | Consecuencia fisiológica                                       |
|---------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------------------------------------------|
| <b>Aumento de <math>CO_2</math> (hipercapnia)</b> | Hacia la derecha           | Favorece la liberación de $O_2$ (Efecto Bohr)                  |
| <b>Disminución del pH (acidosis)</b>              | Hacia la derecha           | Facilita la entrega de $O_2$ a tejidos metabólicamente activos |
| <b>Aumento de temperatura</b>                     | Hacia la derecha           | Promueve la liberación de $O_2$ en músculos en ejercicio       |
| <b>Aumento de 2,3-DPG en eritrocitos</b>          | Hacia la derecha           | Reduce afinidad de la Hb por $O_2$ , facilita su descarga      |

**Fuente:** Adaptado de Sil (2024)

La relación entre la presión parcial de oxígeno y el grado de saturación de la hemoglobina es fundamental para entender cómo los tejidos reciben el  $O_2$  que requieren según su demanda metabólica. Esta interacción se representa mediante

la curva de disociación de la hemoglobina, la cual se desplaza hacia la derecha o hacia la izquierda en respuesta a variaciones en el pH, la temperatura, el  $\text{CO}_2$  o la concentración de 2,3-DPG. Tales desplazamientos permiten ajustar dinámicamente la afinidad de la hemoglobina por el oxígeno, facilitando su liberación en tejidos activos o su captación en los pulmones. La siguiente figura ilustra estos cambios y resume cómo las condiciones fisiológicas modulan la forma de la curva.



**Figura 22.** Curva de disociación de la hemoglobina

**Fuente:** MSD Manuals (2025)

### Transporte de Dióxido de Carbono

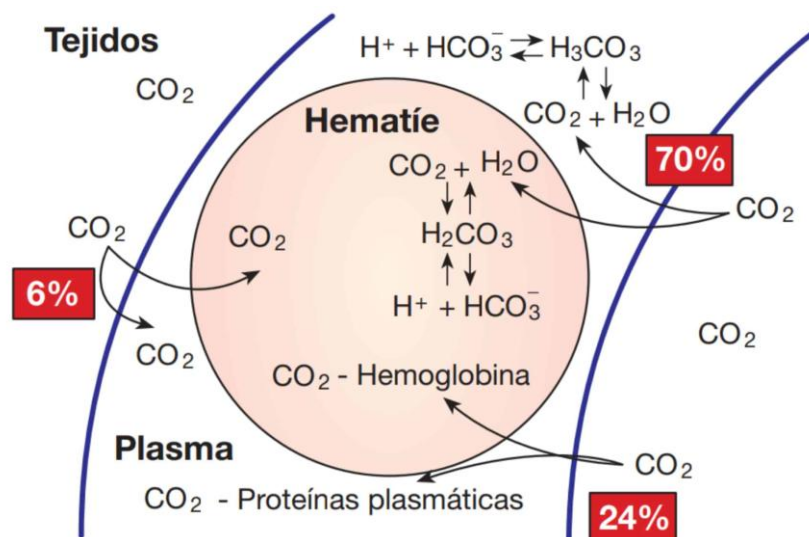
El  $\text{CO}_2$ , producido en los tejidos como resultado del metabolismo celular, es transportado de regreso a los pulmones a través de tres mecanismos principales:

1. **Disuelto en el plasma (6-10%):** Esta fracción representa la porción de dióxido de carbono que puede difundirse libremente hacia los alvéolos para su eliminación.
2. **Unido a proteínas (20-24%):** El  $\text{CO}_2$  se une de manera reversible a los grupos amino de las proteínas plasmáticas y, especialmente, de la hemoglobina, formando *carbaminohemoglobina* ( $\text{HbCO}_2$ ). Esta forma de

transporte se favorece cuando la hemoglobina está desoxigenada, facilitando la captación de  $\text{CO}_2$  en los tejidos periféricos (efecto Haldane).

3. **Convertido en bicarbonato (70%):** La mayor parte del  $\text{CO}_2$  que entra a los eritrocitos se convierte en ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) mediante la acción de la anhidrasa carbónica. El ácido carbónico se disocia rápidamente en bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) e iones de hidrógeno ( $\text{H}^+$ ). El bicarbonato generado se transporta hacia el plasma en intercambio con iones cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) a través del llamado "efecto cloruro" o "intercambio de Hamburger", permitiendo mantener el equilibrio iónico dentro de los eritrocitos (Arthurs & Sudhakar, 2005).

Tras su producción en los tejidos, el dióxido de carbono debe ser transportado eficientemente hacia los pulmones para su eliminación. Este proceso se realiza a través de diversas rutas complementarias que permiten mantener el equilibrio ácido-base y evitar la acumulación de  $\text{CO}_2$  en el organismo. La figura siguiente sintetiza las tres vías principales de transporte del  $\text{CO}_2$  en la sangre, ilustrando su contribución porcentual y los mecanismos moleculares implicados en cada una de ellas.



**Figura 23.** Vías de transporte del dióxido de carbono desde los tejidos hacia la sangre.

**Fuente:** Ortiz (2020)

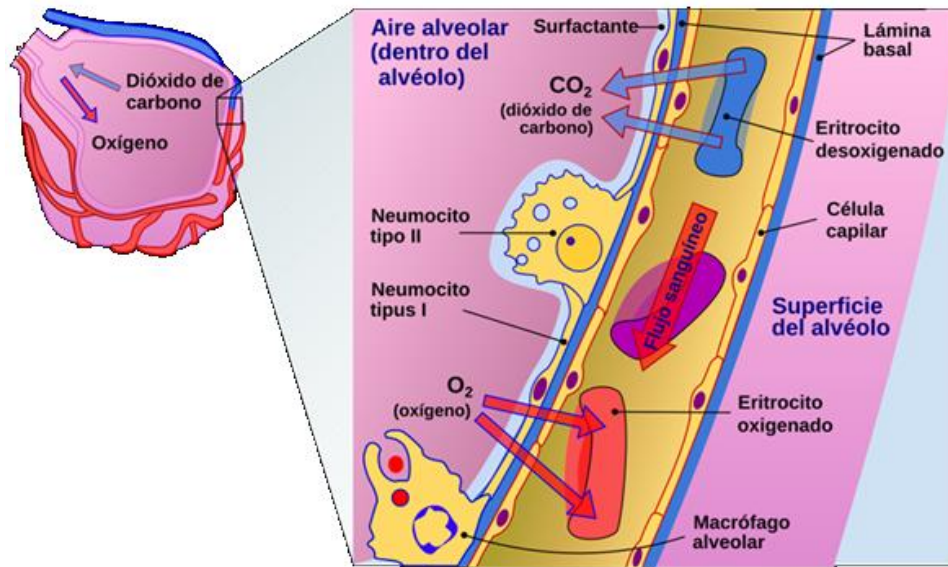
El dióxido de carbono producido por el metabolismo celular debe ser transportado de manera eficiente desde los tejidos hasta los pulmones para su eliminación. Este proceso no ocurre de una sola forma, sino mediante tres mecanismos complementarios que garantizan un movimiento adecuado de CO<sub>2</sub> incluso ante variaciones en la actividad metabólica. Cada vía de transporte posee características particulares que determinan su relevancia fisiológica, desde la fracción disuelta responsable de la presión parcial del gas, hasta la conversión en bicarbonato o la formación de carbaminohemoglobina. La siguiente tabla resume estas formas de transporte y su contribución relativa al manejo del CO<sub>2</sub> en la sangre.

**Tabla 17.** Formas de Transporte del Dióxido de Carbono

| Forma de transporte                              | Porcentaje aproximado | Mecanismo                                                                             |
|--------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)</b> | ~70%                  | Conversión catalizada por anhidrasa carbónica en eritrocitos                          |
| <b>Carbaminohemoglobina (HbCO<sub>2</sub>)</b>   | ~20-24%               | Unión reversible del CO <sub>2</sub> a la hemoglobina sin necesidad de O <sub>2</sub> |
| <b>Disuelto en plasma</b>                        | ~6-10%                | Forma libre, responsable de la presión parcial de CO <sub>2</sub>                     |

**Fuente:** Adaptado de Arthurs & Sudhakar (2005)

El intercambio gaseoso pulmonar depende de un delgado pero altamente especializado sistema de difusión entre el aire alveolar y la sangre capilar. La estructura de la membrana alveolocapilar, la presencia de surfactante y la dinámica de la perfusión pulmonar trabajan coordinadamente para permitir el movimiento eficiente de O<sub>2</sub> hacia la sangre y la eliminación simultánea de CO<sub>2</sub>. La siguiente figura muestra de manera esquemática este proceso, destacando los pasos clave del intercambio y los elementos celulares que lo hacen posible.



**Figura 24.** Intercambio gaseoso alveolocapilar: difusión de oxígeno y dióxido de carbono a través de la membrana respiratoria

**Fuente:** LadyofHats (2018)

## Regulación de la Respiración

La respiración no es un proceso meramente automático, sino que responde a una compleja red de mecanismos de regulación que aseguran una ventilación adecuada para las demandas metabólicas del organismo. Esta regulación se realiza a través de sistemas neurales, químicos y hormonales.

### ***Control Neural***

El control principal de la respiración está ubicado en el tronco encefálico, específicamente en el bulbo raquídeo y la protuberancia (puente) (Abara & Cepeda, 2022).

- **Centro respiratorio dorsal (CRD):** Localizado en la parte dorsal del bulbo raquídeo, es responsable de generar el ritmo básico de la inspiración, actuando como un "marcapasos respiratorio". Su actividad rítmica estimula las neuronas motoras del nervio frénico, que a su vez controla la contracción del diafragma.

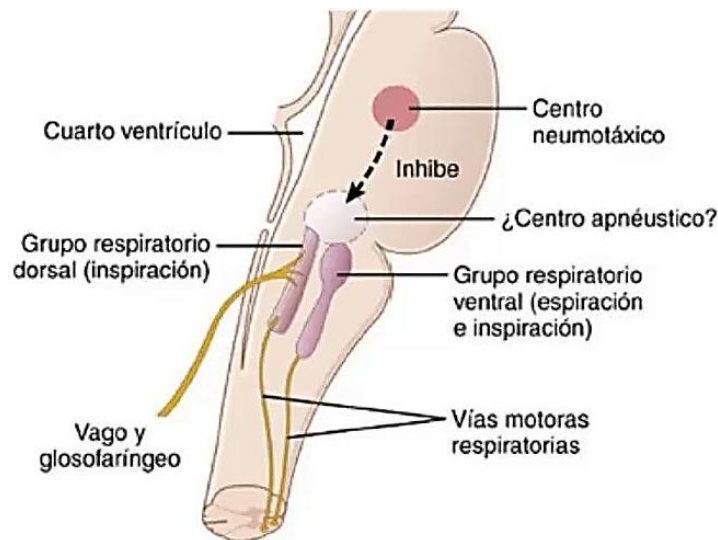
- **Centro respiratorio ventral (CRV):** Situado en la porción ventral del bulbo, este centro permanece inactivo durante la respiración en reposo, pero se activa durante la espiración forzada y el ejercicio, coordinando la contracción de músculos espiratorios como los abdominales e intercostales internos.
- **Centro neumotáxico** (en la protuberancia dorsal): Su función es limitar la duración de la inspiración, actuando como un "freno inspiratorio", favoreciendo así una respiración más rápida y superficial cuando es necesario.
- **Centro apnéustico** (en la protuberancia inferior): Su estimulación prolonga la inspiración, contribuyendo a generar patrones de respiración más profundos y lentos cuando el organismo lo requiere.
- **Núcleo del tracto solitario (NTS):** Recibe aferencias provenientes de los quimiorreceptores periféricos (carotídeos y aórticos) y de los mecanorreceptores pulmonares, integrando la información química y mecánica para ajustar la frecuencia y profundidad respiratoria.

Además, la respiración es modulada por reflejos pulmonares, como el reflejo de Hering-Breuer, que inhibe la inspiración cuando los pulmones se distienden excesivamente, protegiendo contra la sobreinflación.

Los impulsos motores generados en los centros respiratorios descienden por la médula espinal y activan principalmente el nervio frénico (origen en segmentos cervicales C3-C5), que inerva el diafragma, y los nervios intercostales, que controlan los músculos intercostales. Esta integración garantiza la sincronización precisa de los movimientos respiratorios automáticos con las necesidades metabólicas del organismo (Abara & Cepeda, 2022).

Para comprender de forma integrada cómo se coordina la respiración automática, resulta fundamental visualizar la organización funcional de los centros respiratorios ubicados en el tronco encefálico. Estas estructuras neuroanatómicas regulan el ritmo, la profundidad y la secuencia de los movimientos respiratorios mediante circuitos internos altamente sincronizados, que responden continuamente a señales químicas y mecánicas del organismo. La siguiente figura

ilustra de manera esquemática la localización y funciones principales de estos núcleos respiratorios, facilitando la comprensión de su papel en el control ventilatorio.



**Figura 25.** Organización de los centros respiratorios en el tronco encefálico

**Fuente:** Saleh (2024)

En la figura 25 se visualiza la ubicación anatómica de los principales centros respiratorios en el tronco encefálico: el grupo respiratorio dorsal (implicado en la inspiración), el grupo respiratorio ventral (activo durante la espiración forzada), y los centros de la protuberancia (neumotáxico y apnéustico), encargados de modular la frecuencia y el ritmo respiratorio. También se muestran las vías aferentes (nervios vago y glossofaríngeo) y las vías motoras responsables de la ejecución del patrón respiratorio.

### Control Químico

La ventilación pulmonar no solo depende de mecanismos neurales automáticos, sino también de la detección de cambios químicos en la sangre y en el líquido cefalorraquídeo. Estos cambios son percibidos por sensores especializados llamados quimiorreceptores.

- **Quimiorreceptores centrales:** Ubicados en la superficie ventral del bulbo raquídeo, son altamente sensibles a variaciones en la presión parcial de dióxido de carbono ( $\text{PCO}_2$ ) y al pH del líquido cefalorraquídeo. Aunque no responden directamente a los niveles de oxígeno, detectan la acidificación que se produce cuando aumenta el  $\text{CO}_2$  (por formación de ácido carbónico), siendo el principal estímulo ventilatorio en condiciones normales.
- **Quimiorreceptores periféricos:** Localizados en los cuerpos carotídeos y aórticos, son sensibles a caídas de la presión parcial de oxígeno ( $\text{PO}_2$ ), incrementos de  $\text{PCO}_2$  y disminuciones del pH sanguíneo. A diferencia de los centrales, los quimiorreceptores periféricos permiten una respuesta ventilatoria rápida y crucial frente a estados de hipoxemia severa, como ocurre en altitudes elevadas o en patologías respiratorias (L. García et al., 2011).

En conjunto, estos sensores ajustan la frecuencia y la profundidad respiratoria para mantener la homeostasis de los gases sanguíneos y el equilibrio ácido-base.

En hipercapnia ( $\text{CO}_2$  elevado) o acidosis, la ventilación aumenta para eliminar  $\text{CO}_2$  y normalizar el pH.

En hipoxia, los quimiorreceptores periféricos aumentan la señal al centro respiratorio para elevar la oxigenación (González et al., 2003).

## Regulación Hormonal

Aunque el control neural y químico son los principales reguladores de la ventilación, diversas hormonas pueden modular la función respiratoria en situaciones fisiológicas o patológicas específicas. Estas hormonas actúan sensibilizando los centros respiratorios o alterando indirectamente el patrón de ventilación a través de sus efectos sistémicos sobre la circulación o el metabolismo.

Además del control neural y mecánico de la respiración, diversas hormonas ejercen una modulación significativa sobre la actividad ventilatoria, ajustando la respuesta respiratoria a distintas demandas fisiológicas. Estos mediadores

endocrinos actúan sobre centros respiratorios, quimiorreceptores y músculos ventilatorios, permitiendo adaptar la frecuencia y profundidad respiratoria ante situaciones como el estrés, la hipovolemia o la gestación. La siguiente tabla resume las principales hormonas implicadas en este proceso y las condiciones fisiológicas en las que su acción se vuelve especialmente relevante.

**Tabla 18.** Hormonas involucradas en la regulación de la función respiratoria: efectos y condiciones fisiológicas asociadas.

| Hormona                         | Efecto sobre la respiración                                                | Condición fisiológica asociada  |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| <b>Adrenalina/Noradrenalina</b> | Aumentan la frecuencia respiratoria                                        | Estrés, ejercicio, hipoglucemia |
| <b>Angiotensina II</b>          | Estimula centros respiratorios; promueve vasoconstricción                  | Hipovolemia, hipotensión        |
| <b>Progesterona</b>             | Aumenta la ventilación (efecto sensibilizador sobre los quimiorreceptores) | Gestación en algunas especies   |

**Fuente:** Adaptado de Nieto et al. (2004)

Estas modulaciones hormonales permiten al sistema respiratorio adaptarse más eficientemente a cambios fisiológicos, como el incremento de la demanda metabólica durante el ejercicio o la necesidad de mejorar la oxigenación fetal en la gestación.

### **Relación del Sistema Respiratorio con el Equilibrio Ácido-Base**

El mantenimiento del pH sanguíneo es fundamental para la actividad enzimática, la estabilidad de las membranas celulares y la homeostasis general del organismo. Entre los sistemas fisiológicos que intervienen en esta regulación, el sistema respiratorio cumple un papel determinante debido a su capacidad para controlar la concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), considerado un ácido volátil. Esta capacidad permite al organismo responder rápidamente a

desequilibrios ácido-base, funcionando como un sistema compensatorio dinámico frente a alteraciones metabólicas o respiratorias (Medellín, 2008).

### **Mantenimiento del pH: el Rol del CO<sub>2</sub>**

La sangre contiene un importante sistema buffer (amortiguador) basado en la interacción entre el bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y el CO<sub>2</sub> disuelto (Medellín, 2008). Esta relación se explica mediante la ecuación de Henderson-Hasselbach, que describe cómo el equilibrio entre los protones (H<sup>+</sup>) y el bicarbonato determina el pH sanguíneo:

$$\text{pH} = \text{pK}_a + \log \left( \frac{[\text{HCO}_3^-]}{0.03 \times \text{PCO}_2} \right)$$

En esta ecuación:

- **[HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>]** representa la concentración de bicarbonato en sangre.
- **PCO<sub>2</sub>** es la presión parcial de dióxido de carbono.
- **pK<sub>a</sub>** es la constante de disociación del ácido carbónico (~6.1).

Una acumulación de CO<sub>2</sub>, al combinarse con el agua, forma ácido carbónico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), que se disocia en H<sup>+</sup> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Por tanto, un aumento del CO<sub>2</sub> genera acidez (disminuye el pH), mientras que su eliminación por los pulmones ayuda a reducir la carga ácida (Pardo & Matuz, 2014).

El dióxido de carbono es uno de los principales reguladores del equilibrio ácido-base, debido a que su concentración sanguínea determina la formación de ácido carbónico y, por tanto, las variaciones en el pH. Cambios en la PCO<sub>2</sub> desencadenan ajustes ventilatorios inmediatos que permiten compensar la acidosis o alcalosis generadas por la acumulación o eliminación excesiva de CO<sub>2</sub>. La siguiente tabla resume cómo las alteraciones en la PCO<sub>2</sub> afectan el pH sanguíneo y las respuestas respiratorias asociadas.

**Tabla 19.** Influencia del CO<sub>2</sub> sobre el pH Sanguíneo

| Condición        | Cambio PCO <sub>2</sub> | en Efecto sobre el pH | Respuesta del organismo                                    |
|------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------------------------------------------|
| Hipoventilación  | ↑ (acumulación)         | Disminuye (acidosis)  | Aumento de la ventilación como compensación                |
| Hiperventilación | ↓ (eliminación)         | Aumenta (alcalosis)   | Disminución de la ventilación para retener CO <sub>2</sub> |

**Fuente:** Adaptado de Vera (2018)

**Compensación Respiratoria**

La ventilación pulmonar actúa como un mecanismo de compensación rápida ante trastornos metabólicos que alteran el equilibrio ácido-base (Alcázar et al., 2025). Este ajuste se da en cuestión de minutos u horas, lo que lo convierte en una herramienta homeostática eficiente:

- **Acidosis metabólica:** Se incrementa la frecuencia y profundidad respiratoria para expulsar más CO<sub>2</sub>, disminuyendo así la acidez y ayudando a normalizar el pH (Kunchur et al., 2024).
- **Alcalosis metabólica:** La ventilación se reduce (hipoventilación compensatoria) para **retener CO<sub>2</sub>**, aumentando la concentración de H<sup>+</sup> y equilibrando el pH.

Este tipo de compensación permite mantener el pH sanguíneo en un rango fisiológico estrecho (7.35-7.45), evitando daños celulares y alteraciones enzimáticas (Hidalgo et al., 2005).

## Conceptos Adicionales y Aspectos Integrales

### Surfactante Pulmonar

El surfactante es una sustancia lipoproteica secretada por los neumocitos tipo II presentes en los alvéolos pulmonares. Su función principal es reducir la tensión superficial en la interfaz aire-líquido, evitando el colapso alveolar al final de la espiración y facilitando la expansión pulmonar durante la inspiración (Cruz et al., 2023).

Este componente es esencial para mantener la compliance pulmonar y asegurar un intercambio gaseoso eficaz. La ausencia o deficiencia de surfactante, como ocurre en animales neonatos prematuros o en ciertas enfermedades respiratorias, compromete severamente la función pulmonar.

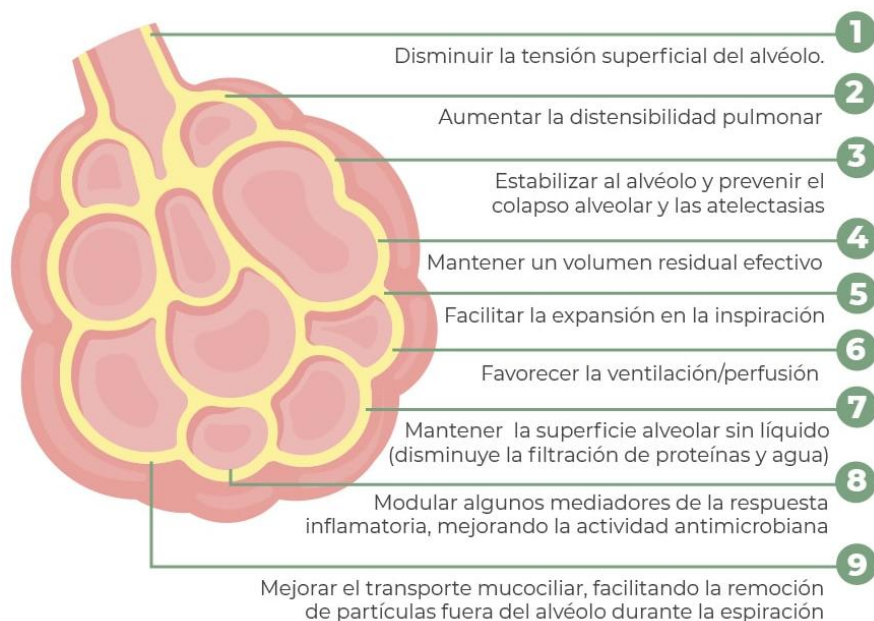
Además de su efecto mecánico sobre la tensión superficial alveolar, el surfactante pulmonar desempeña múltiples funciones esenciales para la estabilidad estructural y la eficiencia respiratoria. Este compuesto lipoproteico contribuye al mantenimiento de la expansión alveolar, previene el colapso durante la espiración y facilita la distribución uniforme del aire en los pulmones. La tabla siguiente sintetiza las funciones fisiológicas más relevantes del surfactante y su importancia en la mecánica pulmonar.

**Tabla 20.** Funciones Fisiológicas del Surfactante Pulmonar

| Función                             | Importancia Fisiológica                                               |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Reducción de la tensión superficial | Previene el colapso alveolar (atelectasia)                            |
| Mejora la compliance pulmonar       | Facilita la expansión de los pulmones con menor esfuerzo respiratorio |
| Estabiliza el tamaño alveolar       | Permite que alvéolos de distintos tamaños permanezcan abiertos        |
| Prevención de edema alveolar        | Disminuye la presión capilar necesaria para la reabsorción de líquido |

**Fuente:** Adaptado de Johnson et al. (2022)

Para comprender de manera visual el impacto del surfactante pulmonar en la estabilidad y eficiencia del sistema respiratorio, es útil revisar sus principales funciones integradas a nivel alveolar. Este compuesto lipoproteico secretado por los neumocitos tipo II no solo reduce la tensión superficial, sino que también mantiene la integridad estructural del alvéolo, favorece la ventilación homogénea y optimiza la relación ventilación/perfusión. La figura siguiente sintetiza gráficamente estas funciones clave, facilitando la comprensión de su papel fisiológico en la mecánica respiratoria.



**Figura 26.** Principales funciones del surfactante pulmonar en la fisiología respiratoria

**Fuente:** Otero (2020)

### Índice Ventilación-Perfusión (V/Q)

La eficiencia del intercambio gaseoso depende de una relación adecuada entre la ventilación alveolar (V) y la perfusión capilar pulmonar (Q). Este índice V/Q permite evaluar cuán bien se está oxigenando la sangre en relación con el flujo de aire en los pulmones (Johnson et al., 2022).

- Una relación V/Q normal es de aproximadamente 0.8-1.

- Un shunt fisiológico se presenta cuando hay perfusión sin ventilación ( $V/Q$  bajo), como en atelectasias o neumonía.
- Un espacio muerto ocurre cuando hay ventilación sin perfusión ( $V/Q$  alto), como en embolia pulmonar.

Para integrar la importancia fisiológica de la relación ventilación/perfusión ( $V/Q$ ), resulta útil analizar cómo distintos desajustes afectan la oxigenación y la eficiencia del intercambio gaseoso. Las alteraciones en este equilibrio pueden deberse tanto a limitaciones en la ventilación como a restricciones en el flujo sanguíneo, generando hipoxemia de distinta magnitud según el tipo de compromiso. La siguiente tabla resume las condiciones clínicas más frecuentes asociadas a discrepancias en la relación  $V/Q$  y las consecuencias fisiológicas derivadas de estos desajustes.

**Tabla 21.** Desajustes  $V/Q$  y su Impacto Fisiológico

| Condición                    | Relación $V/Q$                   | Consecuencia                                |
|------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------|
| <b>Neumonía, atelectasia</b> | Bajo ( $\downarrow V/Q$ )        | Hipoxemia por falta de ventilación alveolar |
| <b>Embolia pulmonar</b>      | Alto ( $\uparrow V/Q$ )          | Ventilación no aprovechada, hipoxemia leve  |
| <b>Zona basal pulmonar</b>   | $V/Q \downarrow$ (más perfusión) | Intercambio reducido pero funcional         |
| <b>Zona apical pulmonar</b>  | $V/Q \uparrow$ (más ventilación) | Mejora relativa del intercambio gaseoso     |

**Fuente:** Adaptado de Franklin et al. (2012)

## Efectos Bohr y Haldane

El transporte de gases por la hemoglobina no es un proceso estático, sino que se ajusta dinámicamente según las condiciones metabólicas locales. Dos principios fisiológicos fundamentales, el efecto Bohr y el efecto Haldane, modulan la afinidad de la hemoglobina por el oxígeno ( $O_2$ ) y el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), optimizando el intercambio gaseoso tanto en los tejidos como en los pulmones (Saavedra et al., 2022). Estos efectos permiten que la hemoglobina funcione como

un verdadero “sensor metabólico”, adaptándose a las necesidades energéticas del organismo.

- **Efecto Bohr: Facilitación de la descarga de oxígeno en tejidos metabólicamente activos**

El efecto Bohr describe cómo las variaciones en pH,  $\text{PCO}_2$ , temperatura y concentración de iones  $\text{H}^+$  influyen en la afinidad de la hemoglobina por el  $\text{O}_2$  (Saavedra et al., 2022).

En los tejidos periféricos, especialmente en músculos durante ejercicio o actividad intensa, se producen tres cambios clave:

1. Aumento de  $\text{CO}_2$  liberado por el metabolismo celular
2. Acumulación de  $\text{H}^+$  que reduce el pH local (acidosis metabólica transitoria)
3. Aumento de la temperatura por trabajo muscular

Estos cambios desplazan la curva de disociación de la hemoglobina hacia la derecha, disminuyendo su afinidad por el  $\text{O}_2$ . Como consecuencia, la hemoglobina libera más fácilmente el oxígeno en las zonas donde se necesita con mayor urgencia.

En perros y gatos, el efecto Bohr es fundamental durante carreras rápidas o juegos intensos, permitiendo que los músculos reciban mayor oxigenación. En caballos atletas, este efecto es crítico: durante un galope sostenido, el pH puede descender significativamente y la hemoglobina descarga  $\text{O}_2$  con gran eficiencia. Por otro lado, en aves, especialmente las de vuelo sostenido (como palomas o patos migratorios), el efecto Bohr está altamente desarrollado, permitiendo sostener tasas metabólicas extremas (Andrade & Bertrand, 2022).

- **Efecto Haldane: Optimización de la eliminación de  $\text{CO}_2$  en los pulmones**

El efecto Haldane describe la influencia del oxígeno sobre la capacidad de la hemoglobina para transportar  $\text{CO}_2$ .

Este efecto ocurre principalmente en los pulmones:

- Cuando la hemoglobina se oxigena en los alvéolos, pierde afinidad por el CO<sub>2</sub>.
- Esto facilita que el CO<sub>2</sub> se libere desde los eritrocitos hacia el alvéolo, desde donde es eliminado con la espiración.

El efecto Haldane es más potente que el efecto Bohr en términos de regulación global del transporte de CO<sub>2</sub>. De hecho, más del 60% del CO<sub>2</sub> transportado en forma de carbaminohemoglobina y bicarbonato es eliminado gracias a este mecanismo (Ortiz, 2020).

En caballos, con ventilaciones superiores a 1500 L/min durante el ejercicio, el efecto Haldane asegura la eliminación de CO<sub>2</sub> incluso cuando el tiempo de tránsito capilar disminuye drásticamente. En bovinos, cuya ventilación es menos eficiente que la de los equinos, el efecto Haldane compensa parcialmente la menor capacidad de difusión de gases. Es importante mencionar que, en aves, donde el intercambio gaseoso ocurre en parabronquios, el principio se mantiene: la oxigenación rápida de la hemoglobina facilita la liberación de CO<sub>2</sub> hacia los capilares aéreos.

## **Adaptaciones respiratorias en ejercicio, estrés y variabilidad comparada en especies domésticas**

Esta sección aborda las adaptaciones respiratorias que se presentan en distintas situaciones fisiológicas, especialmente durante el ejercicio intenso y en condiciones de estrés, así como las particularidades anatómicas y fisiológicas que diferencian la función respiratoria en distintas especies domésticas.

### **Adaptaciones respiratorias durante el ejercicio y estrés**

Durante el ejercicio, la ventilación pulmonar incrementa notablemente para satisfacer la creciente demanda metabólica de oxígeno y la eliminación de dióxido de carbono, alcanzando hasta 30 veces los niveles basales en ciertas especies como el caballo (Brejov, 2014). Esta respuesta ventilatoria presenta varias fases. Inicialmente ocurre un aumento abrupto, mediado principalmente por impulsos

nerviosos centrales y propioceptivos provenientes de músculos y articulaciones, seguido por un incremento más gradual y sostenido ajustado a los cambios en las concentraciones sanguíneas de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> (Saavedra et al., 2022).

Los caballos poseen adaptaciones fisiológicas particulares relacionadas con el ejercicio, entre ellas, la sincronización respiratoria con la zancada durante el galope, estableciendo una relación de una respiración por cada zancada (1:1). Esta sincronización se debe principalmente a la mecánica corporal: durante la fase de suspensión del galope ocurre la inspiración por desplazamiento visceral, mientras que durante el apoyo se facilita la espiración (Franklin et al., 2012). La frecuencia respiratoria máxima está limitada por el ritmo del galope, pero se compensa por elevados volúmenes corrientes que pueden alcanzar entre 12 y 15 litros por respiración, permitiendo volúmenes minuto superiores a los 1500 L/min a máxima intensidad en caballos purasangre (Franklin et al., 2012).

En otras especies, como perros, la sincronización respiratoria con la locomoción es menos estricta, permitiendo patrones ventilatorios más flexibles y aumentando considerablemente la frecuencia respiratoria independientemente del patrón locomotor. Además, en situaciones de hipertermia o estrés térmico, muchas especies, incluyendo perros y rumiantes, incrementan rápidamente su frecuencia respiratoria en respiraciones superficiales (polipnea térmica o jadeo) para disipar calor mediante la evaporación en las vías respiratorias superiores, a diferencia de especies como el caballo, que recurre predominantemente (Deban & Carrier, 2002) a la pérdida de calor por sudoración (Deban & Carrier, 2002).

### **Variaciones comparativas en especies domésticas**

La fisiología respiratoria varía considerablemente entre las distintas especies domésticas, reflejando adaptaciones evolutivas específicas según necesidades metabólicas, anatómicas y ecológicas.

- **Équidos:** Son respiradores nasales obligados debido a la configuración anatómica del paladar blando sobre la epiglotis, lo que implica que obstrucciones de la vía aérea superior afecten significativamente su función

respiratoria. Sus pulmones presentan gran capacidad ventilatoria y resistencia relativamente baja al flujo aéreo, favoreciendo la eficiencia respiratoria durante el ejercicio. Sin embargo, están predispuestos a enfermedades respiratorias específicas como la hemorragia pulmonar inducida por ejercicio (EIPH) y el asma equina, que limitan la eficiencia del intercambio gaseoso (Muriel et al., 2022).

- **Rumiantes (bovinos, ovinos, caprinos):** Poseen pulmones con lobulación marcada, tabiques conectivos desarrollados y menor elasticidad pulmonar, resultando en una reserva respiratoria menor. Estas características explican la mayor susceptibilidad a hipoxemia en situaciones de alta demanda metabólica o estrés ambiental. Adicionalmente, los rumiantes cuentan con macrófagos intravasculares pulmonares altamente activos que, aunque beneficiosos para la filtración de patógenos, aumentan el riesgo de respuestas inflamatorias pulmonares agudas (Maina, 2014).
- **Carnívoros (perros y gatos):** Presentan estructuras respiratorias intermedias con vías aéreas superiores relativamente simples, facilitando diferentes patrones respiratorios desde ventilación nasal tranquila hasta jadeo rápido para termorregulación. Destacan las particularidades de perros braquicéfalos que, debido a su conformación anatómica, presentan problemas respiratorios significativos como estenosis nasal y elongación del paladar blando, condicionando síndromes obstructivos respiratorios (Bofan et al., 2015).
- **Porcinos:** Los cerdos comparten características pulmonares con rumiantes, mostrando pulmones relativamente pequeños y lobulados, lo que limita su capacidad ventilatoria. Debido a la escasa eficiencia en termorregulación respiratoria y a la ausencia significativa de sudoración, los cerdos son especialmente susceptibles al estrés térmico y al golpe de calor (Johnson et al., 2022)
- **Aves (pollos y aves domésticas):** Poseen un sistema respiratorio único y altamente eficiente, caracterizado por pulmones rígidos asociados a un sistema de sacos aéreos que facilitan un flujo de aire unidireccional continuo. Este diseño optimiza la extracción de oxígeno mediante un sistema de

intercambio contracorriente, permitiendo que las aves mantengan elevadas demandas metabólicas durante el vuelo a grandes altitudes, incluso con presiones parciales de oxígeno reducidas (Maina, 2014). Es relevante mencionar que las aves carecen de diafragma y que la ventilación depende exclusivamente de movimientos torácicos y esternales, por lo que ciertas manipulaciones pueden comprometer rápidamente su respiración (Plazas & Peñuela, 2012).

- **Reptiles y otras especies exóticas:** En reptiles domésticos, la respiración es dependiente de músculos intercostales, ya que carecen de diafragma, resultando en patrones respiratorios lentos y altamente dependientes de la temperatura ambiental. En peces ornamentales, el intercambio gaseoso ocurre principalmente en branquias, presentando adaptaciones muy diferentes a las observadas en mamíferos (Carpenter & Marion, 2023)

La comprensión de estas variaciones comparativas permite a los profesionales veterinarios adaptar estrategias clínicas y de manejo para mejorar el diagnóstico, tratamiento y prevención de trastornos respiratorios en diferentes especies.

## **Interacciones del Sistema Respiratorio con Otros Sistemas**

El sistema respiratorio no funciona de forma aislada; por el contrario, su eficacia depende de su integración con otros sistemas del organismo. Esta cooperación permite mantener la homeostasis, asegurar un intercambio gaseoso eficiente y responder a las demandas fisiológicas variables, como el ejercicio, el estrés térmico o las alteraciones del equilibrio ácido-base. Las principales interacciones ocurren con el sistema cardiovascular, el sistema nervioso, el metabolismo energético y la termorregulación (Escobar, 2005).

## **Relación con el Sistema Cardiovascular**

El sistema respiratorio y el cardiovascular forman una unidad funcional interdependiente. La ventilación alveolar proporciona el oxígeno necesario para la oxigenación de la sangre, mientras que la perfusión capilar pulmonar asegura el transporte de los gases hacia y desde los tejidos. Esta coordinación se conoce como acoplamiento ventilación-perfusión ( $V/Q$ ), y su equilibrio es esencial para una oxigenación eficaz (Johnson et al., 2022).

El gasto cardíaco, que representa el volumen de sangre bombeado por el corazón por minuto, influye directamente sobre la cantidad de oxígeno disponible para los tejidos. Si el gasto cardíaco es insuficiente, aunque la ventilación sea adecuada, se compromete la oxigenación tisular. Por otro lado, si la ventilación es deficiente, la sangre puede pasar por los pulmones sin ser oxigenada, fenómeno conocido como *shunt* fisiológico (Gruartmoner et al., 2014).

La hipoxia, entendida como una disminución del aporte de oxígeno a los tejidos, desencadena múltiples respuestas cardiovasculares compensatorias. Entre ellas se encuentran la vasodilatación local, el aumento de la frecuencia cardíaca y del volumen sistólico, con el objetivo de mejorar la perfusión tisular. Sin embargo, cuando estas respuestas se mantienen de forma prolongada, pueden derivar en trastornos como la hipertensión pulmonar (Caramelo et al., 2006).

Durante la ventilación, los cambios de presión intratorácica también afectan la función cardiovascular. En la inspiración, la presión intrapleural se vuelve más negativa, favoreciendo el retorno venoso al corazón derecho. En la espiración, especialmente durante esfuerzos, la presión positiva puede limitar el retorno venoso, impactando la precarga y, en consecuencia, el gasto cardíaco.

## **Relación con el Sistema Nervioso**

El control de la respiración depende en gran medida del sistema nervioso central. Los centros respiratorios ubicados en el bulbo raquídeo y la protuberancia (puente) integran señales sensoriales y motoras para regular el ritmo, la profundidad y la frecuencia respiratoria. El centro respiratorio dorsal se encarga de

la inspiración básica, mientras que el ventral modula tanto la inspiración como la espiración activa. Los centros neumotáxico y apnéustico ajustan el tiempo inspiratorio y la transición entre fases respiratorias (Abara & Cepeda, 2022).

El núcleo del tracto solitario (NTS) cumple un rol integrador fundamental al recibir información de quimiorreceptores (centrales y periféricos) y mecanorreceptores pulmonares, ajustando automáticamente la ventilación en respuesta a cambios en la concentración de gases y al estiramiento pulmonar.

Además, la corteza cerebral permite cierto grado de control voluntario sobre la respiración, lo cual es útil en situaciones como la vocalización, el canto o la contención del aliento. Sin embargo, este control es limitado y se ve sobrepasado por los mecanismos automáticos en casos de hipoxia o hipercapnia severa (García et al., 2004).

El sistema nervioso también coordina los reflejos protectores respiratorios, entre ellos el reflejo de la tos, que expulsa partículas irritantes de las vías aéreas inferiores, y el reflejo del estornudo, que protege la cavidad nasal eliminando agentes nocivos (Planchet, 2019).

## **Relación con el Metabolismo y la Termorregulación**

El metabolismo celular requiere un suministro continuo de oxígeno para la producción de ATP mediante la fosforilación oxidativa. Por tanto, existe una relación directa entre la ventilación pulmonar y el nivel de actividad metabólica del organismo. Durante el ejercicio o en estados de aumento metabólico, la demanda de oxígeno se incrementa, y el sistema respiratorio responde aumentando la frecuencia y profundidad de la respiración. Esta respuesta ventilatoria se acompaña de una mayor eliminación de  $\text{CO}_2$ , previniendo así la acidificación del medio interno (Colacilli & Bazán, 2018).

Desde el punto de vista termo-regulatorio, la respiración también juega un rol clave. En especies como los perros o ciertas aves, el jadeo permite la evaporación del agua en la mucosa oral y respiratoria, disipando calor sin perder grandes volúmenes de agua a través del sudor. Este mecanismo, aunque eficaz,

puede alterar la ventilación alveolar y debe estar finamente regulado para no comprometer la oxigenación.

Durante la actividad física, el aumento en la frecuencia respiratoria no solo mejora el intercambio gaseoso, sino que también contribuye a redistribuir el flujo sanguíneo hacia la periferia, facilitando la disipación del calor generado en los músculos (Oviedo & Garcés, 2017).

Finalmente, la eliminación de  $\text{CO}_2$  a través de la respiración es una de las principales vías para mantener el equilibrio ácido-base. El dióxido de carbono, al disolverse en el plasma, forma ácido carbónico, que disocia en protones ( $\text{H}^+$ ) y bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ). Una ventilación eficiente evita la acumulación de  $\text{CO}_2$ , protegiendo el pH sanguíneo (Aristizábal et al., 2015). Este mecanismo es vital para la estabilidad de la función enzimática y la integridad celular.

Para comprender plenamente la fisiología respiratoria, es indispensable analizar cómo este sistema se integra con otras funciones corporales. La respiración no opera de manera aislada, sino que mantiene una estrecha relación con los sistemas cardiovascular, nervioso, metabólico y termorregulador, coordinando respuestas que permiten sostener la homeostasis ante distintos desafíos fisiológicos. La siguiente tabla resume las principales interacciones del sistema respiratorio con otros sistemas del organismo y los resultados funcionales derivados de esta integración.

**Tabla 22.** Interacciones del Sistema Respiratorio con Otros Sistemas Corporales

| Sistema Involucrado          | Mecanismo de Interacción                                                  | Resultado Fisiológico                                                        |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Cardiovascular</b>        | Sincronización entre ventilación y perfusión pulmonar                     | Optimiza el intercambio gaseoso y la distribución de oxígeno                 |
|                              | Cambios en la presión intratorácica durante la ventilación                | Modulan el retorno venoso y el gasto cardíaco                                |
|                              | Hipoxia tisular estimula vasodilatación local y aumenta el gasto cardíaco | Compensación para mejorar la oxigenación                                     |
| <b>Nervioso</b>              | Centros respiratorios regulan el ritmo y profundidad ventilatoria         | Ajuste automático a las demandas metabólicas                                 |
|                              | Reflejos protectores como la tos y el estornudo                           | Expulsión de partículas irritantes o cuerpos extraños                        |
|                              | Control voluntario desde la corteza cerebral                              | Permite la modulación consciente de la respiración (ej. habla, canto)        |
| <b>Metabólico</b>            | Aumento del metabolismo incrementa la demanda de oxígeno                  | Estimula la ventilación para asegurar la producción de ATP                   |
| <b>Termorregulación</b>      | Jadeo y evaporación en vías respiratorias                                 | Disipación del calor corporal en animales sin glándulas sudoríparas          |
| <b>Equilibrio Ácido-Base</b> | Eliminación de CO <sub>2</sub> por los pulmones                           | Regulación del pH sanguíneo mediante la ecuación bicarbonato-ácido carbónico |

**Fuente:** Adaptado de Castillo & Del Pozo (2018)

## Resumen

El sistema respiratorio desempeña una función esencial para mantener la homeostasis y asegurar la oxigenación adecuada de los tejidos mediante el intercambio eficiente de gases. Su estructura anatómica varía significativamente entre las distintas especies animales, reflejando adaptaciones evolutivas a diversas condiciones ambientales y metabólicas.

La vía respiratoria, dividida en superior e inferior, acondiciona el aire inspirado a través de funciones específicas como filtración, calentamiento y humidificación antes de llegar al pulmón. La tráquea y el árbol bronquial distribuyen el aire hasta los alvéolos, donde ocurre el intercambio gaseoso. Los pulmones, formados principalmente por alvéolos altamente vascularizados, constituyen la unidad funcional del intercambio de gases, optimizando la difusión según la ley de Fick.

La ventilación pulmonar, regulada por cambios en las presiones intrapulmonares e intrapleurales, implica procesos activos (inspiración) y pasivos o activos (espiración) según la demanda metabólica. Factores como la compliance pulmonar, la resistencia de las vías aéreas y la tensión superficial alveolar modulan la eficiencia de la ventilación.

Una vez realizado el intercambio gaseoso alveolar, los gases respiratorios son transportados en la sangre: el oxígeno, principalmente unido a la hemoglobina, y el dióxido de carbono convertido mayoritariamente en bicarbonato. La curva de disociación de la hemoglobina y los efectos Bohr y Haldane describen cómo los gases se intercambian de manera eficiente según las condiciones metabólicas.

El control respiratorio está finamente regulado por mecanismos neurales, químicos y hormonales, adaptando la ventilación a las necesidades del organismo. Los centros respiratorios localizados en el bulbo raquídeo y puente, así como los quimiorreceptores centrales y periféricos, integran señales fisiológicas para mantener la homeostasis.

Además, el sistema respiratorio cumple una función crucial en el equilibrio ácido-base mediante la regulación de la concentración de  $\text{CO}_2$ , participando activamente en compensaciones respiratorias para mantener el pH sanguíneo dentro de límites fisiológicos estrechos. El surfactante pulmonar juega un papel clave en mantener la integridad alveolar, mientras que la relación ventilación-perfusión ( $V/Q$ ) asegura la eficiencia del intercambio gaseoso.

Finalmente, las adaptaciones respiratorias especializadas en diversas especies demuestran cómo los organismos han evolucionado estrategias para optimizar la captación de oxígeno en ambientes extremos o durante demandas metabólicas elevadas, así como su interacción integrada con los sistemas cardiovascular, nervioso, metabólico y termorregulador.

El sistema respiratorio asegura la oxigenación de la sangre y la eliminación de  $\text{CO}_2$ , contribuyendo decisivamente al mantenimiento del pH y del equilibrio ácido-base. Sin embargo, la regulación fina de este equilibrio, junto con el control del volumen y composición del medio interno, depende principalmente del riñón. La interacción estrecha entre ambos sistemas refleja que el organismo requiere mecanismos complementarios para sostener la homeostasis, lo que conduce naturalmente al análisis del sistema renal.

## Actividades

### 1. Fundamentos y Estructura Funcional

- a) ¿Cuáles son las funciones fisiológicas del sistema respiratorio más allá del intercambio gaseoso?

---

---

---

- b) Describe cómo las vías respiratorias superiores (nariz, cavidad nasal, faringe y laringe) acondicionan el aire inspirado y cómo influyen en la defensa del sistema respiratorio.

---

---

---

- c) Explica cómo la arquitectura de los pulmones (alvéolos, capilares, neumocitos I y II) permite una alta eficiencia en el intercambio gaseoso. ¿Qué diferencias encuentras con los sacos aéreos en aves o pulmones saculares en reptiles?

---

---

---

---

## 2. Ventilación Pulmonar y su Regulación

- a) Describe paso a paso la inspiración y espiración en condiciones normales, identificando los músculos involucrados y las variaciones de presión intrapulmonar e intrapleurar.

---

---

---

---

- b) ¿Cómo afecta una baja compliance pulmonar, como ocurre en fibrosis, a la mecánica respiratoria? ¿Y una alta resistencia de las vías aéreas, como en el asma?

---

---

---

---

- c) ¿Qué papel cumple el surfactante en la homeostasis respiratoria? Explica sus efectos sobre la tensión superficial y el riesgo de atelectasia.

---

---

---

## 3. Intercambio Gaseoso y Transporte de Gases

- a) Aplica la ley de difusión de Fick para explicar por qué el  $\text{CO}_2$  difunde más fácilmente que el  $\text{O}_2$ , aunque sus gradientes de presión sean menores.

---

---

- b) Enlista cinco factores fisiológicos que afectan la difusión gaseosa y analiza cómo se alteran en una enfermedad pulmonar.

---

---

---

---

---

- c) Compara las formas de transporte de  $O_2$  y  $CO_2$  en la sangre. ¿Qué ventajas ofrece el bicarbonato como mecanismo de transporte del  $CO_2$ ? ¿Qué papel cumplen los efectos Bohr y Haldane?

---

---

---

---

---

---

#### **4. Regulación Fisiológica de la Respiración**

- a) Identifica las estructuras del tronco encefálico que regulan el ritmo respiratorio e indica su función específica.

---

---

---

---

- b) ¿Cómo responden los quimiorreceptores centrales frente a una hipercapnia? ¿Y los periféricos frente a una hipoxia?

---

---

---

---

- c) Explica cómo hormonas como la angiotensina II y las catecolaminas (adrenalina y noradrenalina) ajustan la respiración ante un estado de hipovolemia o ejercicio.

---

---

---

---

### **5. Integración Sistémica**

- a) Explica cómo se coordina la ventilación y la perfusión para asegurar una oxigenación eficiente. ¿Qué consecuencias tiene un desajuste V/Q?

---

---

---

---

---

- b) Relaciona la función respiratoria con el mantenimiento del equilibrio ácido-base. ¿Qué rol cumple el CO<sub>2</sub> en esta regulación?

---

---

---

c) ¿Cómo contribuye el sistema respiratorio a la termorregulación en animales sin glándulas sudoríparas?

---

---

---

## **Taller**

### **1. Mapa Conceptual Integrador: Sistema Respiratorio**

En grupos, elaboren un mapa conceptual que relacione los siguientes ejes:

- Mecánica ventilatoria y presiones.
- Eficiencia del intercambio gaseoso (ley de Fick, gradientes, difusión).
- Transporte de gases (hemoglobina, bicarbonato, efectos fisiológicos).
- Control neural, químico y hormonal.
- Relación con otros sistemas (cardiovascular, ácido-base, termorregulación).

### **2. Análisis de Caso Clínico: Respiración en Condiciones Extremas**

*Objetivo:* Aplicar conocimientos fisiológicos del sistema respiratorio para interpretar adaptaciones en animales expuestos a condiciones desafiantes.

#### **Instrucciones:**

En equipos, seleccionen uno de los siguientes escenarios y realicen un análisis detallado desde el punto de vista fisiológico:

#### **Escenarios disponibles:**

- A. Camélido que vive en zonas de gran altitud (hipoxia crónica).
- B. Foca durante una inmersión prolongada (apnea y redistribución del flujo sanguíneo).
- C. Perro en un día caluroso durante ejercicio intenso (termorregulación por jadeo).
- D. Ave migratoria en vuelo sostenido a gran altitud (ventilación unidireccional y eficiencia metabólica).

#### **Aspectos a desarrollar:**

- ¿Qué desafíos enfrenta el sistema respiratorio en ese entorno?

- ¿Qué mecanismos de adaptación fisiológica se activan (ventilación, difusión, transporte, regulación)?
- ¿Cómo se integra el sistema respiratorio con el cardiovascular, nervioso y metabólico en esa situación?
- Representa tus ideas con esquemas o diagramas explicativos.
- Propón posibles riesgos o alteraciones clínicas si estas adaptaciones fallan.

## Glosario

1. **Vías Respiratorias Superiores:** Incluyen la nariz, cavidad nasal, faringe, laringe, tráquea y árbol bronquial; acondicionan el aire inspirado mediante filtración, humidificación y calentamiento.
2. **Hematosis:** Proceso fisiológico mediante el cual la sangre se oxigena en los pulmones o estructuras equivalentes, intercambiando dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) por oxígeno ( $\text{O}_2$ ). En otras palabras, es el intercambio gaseoso que ocurre principalmente en los alvéolos pulmonares de los mamíferos, donde el oxígeno del aire inhalado pasa a la sangre, y el dióxido de carbono, producto del metabolismo, se elimina hacia el aire espirado.
3. **Laringe:** Contiene las cuerdas vocales y actúa como válvula protectora, evitando el ingreso de alimentos y líquidos a las vías respiratorias.
4. **Tráquea y Árbol Bronquial:** La tráquea, reforzada por anillos cartilaginosos, se ramifica en bronquios y bronquiolos que distribuyen el aire a los pulmones; su estructura varía entre especies para adaptarse a diferentes demandas respiratorias.
5. **Alvéolos:** Pequeñas bolsas de aire en los pulmones donde ocurre el intercambio gaseoso; rodeadas por una extensa red capilar que facilita la difusión de oxígeno y  $\text{CO}_2$ .
6. **Sacos Aéreos:** Estructuras presentes en el sistema respiratorio de las aves que permiten un flujo unidireccional de aire, asegurando un intercambio gaseoso continuo y eficiente.
7. **Pleura y Espacio Pleural:** La pleura es una membrana serosa que recubre los pulmones (visceral) y la cavidad torácica (parietal), separadas por el espacio pleural, el cual contiene líquido lubricante que facilita el deslizamiento durante la ventilación.

8. **Presión Intrapleural:** La presión negativa en el espacio pleural que mantiene los pulmones adheridos a la pared torácica, crucial para su expansión durante la inspiración.
9. **Ventilación Pulmonar:** Proceso mecánico de entrada (inspiración) y salida (expiración) de aire, que permite la renovación del aire en los pulmones y asegura el intercambio de gases.
10. **Inspiración:** Fase activa de la ventilación en la que el diafragma y los músculos intercostales se contraen, aumentando el volumen torácico y permitiendo la entrada de aire.
11. **Espiración:** Fase en la que, en reposo, la relajación del diafragma y músculos intercostales permite la salida de aire; en situaciones de esfuerzo, se activa de forma voluntaria mediante músculos adicionales.
12. **Compliance Pulmonar:** Capacidad de los pulmones para expandirse ante cambios en la presión; una alta compliance facilita la inspiración, mientras que una baja dificulta el proceso.
13. **Resistencia de las Vías Aéreas:** Medida de la dificultad del flujo de aire a través de las vías respiratorias; puede incrementarse por broncoconstricción o inflamación, afectando la eficiencia ventilatoria.
14. **Surfactante Pulmonar:** Sustancia lipoproteica producida por los neumocitos tipo II que reduce la tensión superficial en los alvéolos, evitando su colapso y facilitando su expansión durante la inspiración.
15. **Ley de Difusión de Fick:** Principio que establece que la tasa de difusión de un gas a través de una membrana es proporcional al área de la membrana y a la diferencia de presión parcial, e inversamente proporcional al grosor de la membrana.
16. **Presión Parcial de Gases:** La presión ejercida por un gas específico en una mezcla, esencial para determinar la dirección y magnitud de la difusión de  $O_2$  y  $CO_2$ .

17. **Hemoglobina:** Proteína presente en los glóbulos rojos que transporta oxígeno; su afinidad por el oxígeno se modula según el pH, la temperatura y la concentración de CO<sub>2</sub>.
18. **Efecto Bohr:** Fenómeno en el que la afinidad de la hemoglobina por el oxígeno disminuye en presencia de altos niveles de CO<sub>2</sub> y un pH bajo, facilitando la liberación de oxígeno en los tejidos.
19. **Efecto Haldane:** Mecanismo que facilita la liberación de CO<sub>2</sub> en los pulmones cuando la hemoglobina se une al oxígeno, favoreciendo el transporte de dióxido de carbono.
20. **Quimiorreceptores:** Sensores que detectan cambios en la concentración de O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y pH, localizados en el bulbo raquídeo (centrales) y en el seno carotídeo y arco aórtico (periféricos), ajustando la ventilación.
21. **Centros Respiratorios:** Conjuntos de neuronas en el bulbo raquídeo y el puente (incluyendo centros respiratorio dorsal, ventral, neumotáxico y apnéustico) que coordinan la frecuencia y profundidad de la respiración.
22. **Núcleo del Tracto Solitario (NTS):** Estructura del tronco encefálico que integra señales sensoriales de quimiorreceptores y mecanorreceptores para modular el patrón respiratorio.
23. **Relación Ventilación-Perfusión (V/Q):** La correspondencia entre la ventilación (entrada de aire en los alvéolos) y la perfusión (flujo sanguíneo en los capilares pulmonares); un balance óptimo es crucial para el intercambio gaseoso eficiente.
24. **Shunt:** Situación en la que hay perfusión en áreas pulmonares que no reciben ventilación, lo que puede provocar hipoxemia.
25. **Espacio Muerto:** Zonas del sistema respiratorio donde el aire no participa en el intercambio gaseoso, afectando la eficiencia respiratoria.
26. **Hipoxemia:** Disminución de la concentración de oxígeno en la sangre arterial, generalmente debido a desajustes en la ventilación o perfusión.

27. **Control Neural de la Respiración:** Mecanismos regulados por los centros respiratorios en el sistema nervioso central que ajustan la frecuencia y profundidad de la respiración en función de las necesidades metabólicas.
28. **Control Químico de la Respiración:** Mecanismos basados en la detección de cambios en los niveles de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  y pH mediante quimiorreceptores, que ajustan el patrón respiratorio para mantener la homeostasis.
29. **Jadeo:** Mecanismo de evaporación a través de las vías respiratorias utilizado por algunas especies, como los perros, para disipar el calor y regular la temperatura corporal.
30. **Hipoxia:** Estado en el que el organismo no recibe suficiente oxígeno, lo que puede desencadenar respuestas compensatorias en el sistema respiratorio y cardiovascular.

## **CAPITULO IV**

Sistema Renal

## **Sistema Renal**

Como complemento de la función respiratoria descrita previamente, el sistema renal actúa como el regulador principal del volumen extracelular, la osmolaridad, el pH y la excreción de sustancias. El riñón perfecciona los ajustes que el respiratorio inicia, permitiendo que el medio interno se mantenga estable incluso frente a desafíos metabólicos o ambientales. Su estudio proporciona la base para comprender la regulación integrada de líquidos, electrolitos y equilibrio ácido-base en medicina veterinaria.

### **Introducción**

El sistema renal constituye un eje central en el mantenimiento de la homeostasis en los animales domésticos, ya que regula el volumen, la composición y la osmolaridad de los líquidos corporales, así como el equilibrio ácido-base y la presión arterial. A través de la formación de orina, este sistema asegura la eliminación eficiente de productos de desecho del metabolismo celular, como la urea, el ácido úrico, la creatinina y otras sustancias potencialmente tóxicas (Hall & Hall, 2020).

Anatómicamente, el sistema renal está conformado por los riñones, órganos retroperitoneales encargados del filtrado sanguíneo; los uréteres, que transportan la orina hacia la vejiga urinaria, donde se almacena temporalmente; y la uretra, que permite su eliminación. Esta vía excretora funciona de manera integrada para mantener el equilibrio del medio interno (Sjaastad et al., 2016).

Cada riñón contiene entre cientos de miles a millones de nefronas, que constituyen su unidad funcional. Estas estructuras especializadas realizan los procesos de filtración glomerular, reabsorción y secreción tubular, y concentración o dilución urinaria, dependiendo de las necesidades fisiológicas del animal. Estos procesos están controlados finamente por mecanismos de regulación hormonal y neural, entre los que destacan el sistema renina-angiotensina-aldosterona (RAA), la hormona antidiurética (ADH) y los péptidos natriuréticos atriales (Cunningham & Klein, 2009).

Además de su rol excretor, los riñones cumplen funciones endocrinas vitales, como la síntesis de eritropoyetina, hormona responsable de estimular la producción de eritrocitos en respuesta a la hipoxia, y la activación de la vitamina D en su forma activa (calcitriol), necesaria para el metabolismo del calcio y del fósforo, y para la salud ósea (Reece, 2015).

La fisiología renal no puede entenderse de manera aislada, ya que interactúa de forma constante y bidireccional con los sistemas cardiovascular, respiratorio y endocrino. Por ejemplo, los riñones modulan la presión arterial a través del sistema RAA, mientras que el sistema respiratorio compensa alteraciones del pH mediante la eliminación de CO<sub>2</sub>, complementando la función renal en el mantenimiento del equilibrio ácido-base. Asimismo, diversas hormonas circulantes regulan la función tubular y vascular renal (Hall & Hall, 2020).

Este capítulo desarrollará de manera exhaustiva la anatomía funcional del sistema renal, los procesos fisiológicos clave en la formación de orina, la regulación hormonal y neural de la función renal, y las interacciones del riñón con otros sistemas corporales. Además, se incluirá un enfoque comparativo entre especies veterinarias, analizando diferencias morfofuncionales importantes entre bovinos, caninos y aves, lo que permitirá comprender cómo las adaptaciones evolutivas renales responden a diferentes necesidades fisiológicas. Finalmente, se integrarán casos clínicos y aplicaciones prácticas, tales como insuficiencia renal, deshidratación o trastornos en la producción hormonal, para vincular los conocimientos teóricos con la realidad clínica veterinaria.

## **Objetivos**

- Describir la estructura y función del sistema renal y su papel en la homeostasis.
- Analizar la filtración glomerular, reabsorción y secreción tubular en la regulación sanguínea.
- Explicar la integración renal con otros sistemas en la regulación de la presión arterial y el equilibrio ácido-base.

- Identificar las interacciones del sistema renal con otros sistemas.

### **Preguntas de Enfoque**

1. ¿Cómo contribuyen los riñones al mantenimiento del equilibrio interno (homeostasis) en el organismo?
2. ¿De qué manera la nefrona filtra la sangre y produce orina, y qué procesos ocurren a lo largo del túbulo renal?
3. ¿Cómo ajusta el riñón la concentración y el volumen de la orina en respuesta a cambios en la hidratación o la presión sanguínea?
4. ¿Qué hormonas y señales nerviosas regulan la función renal y qué efectos ejercen (por ejemplo, aldosterona, ADH, péptidos natriuréticos, innervación simpática)?
5. ¿Qué diferencias existen entre especies (como un bovino, un perro y un ave) en la anatomía y fisiología de sus riñones, y cómo se reflejan estas diferencias en la excreción de desechos?

### **Anatomía funcional del sistema renal**

El sistema renal, también denominado aparato urinario, está formado por los riñones y las vías urinarias: uréteres, vejiga urinaria y uretra. Este conjunto de órganos actúa de forma integrada para cumplir funciones esenciales en la homeostasis corporal, entre las que destacan la eliminación de productos nitrogenados, la regulación del equilibrio hídrico y electrolítico, el control del pH y la secreción de hormonas como la eritropoyetina y la renina (Hall & Hall, 2020).

### **Riñones**

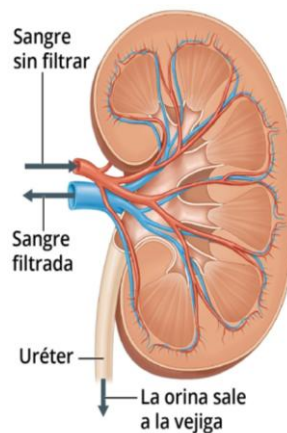
Los riñones son órganos pares, retroperitoneales, con forma variable según la especie (por ejemplo, forma de frijol en el perro y forma cardíaca en el riñón derecho del caballo), situados a ambos lados de la columna vertebral, protegidos por una cápsula fibrosa y una envoltura grasa que amortigua los movimientos

(Sjaastad et al., 2016). El hilio renal se localiza medialmente y permite la entrada de la arteria renal y los nervios, así como la salida de la vena renal, vasos linfáticos y el uréter, formando el pedículo renal.

Internamente, los riñones están organizados en tres regiones fundamentales:

- **Corteza renal:** Es la región más externa y contiene la mayor parte de los glomérulos, cápsulas de Bowman y segmentos iniciales de los túbulos proximales y distales. Se caracteriza por su aspecto granular debido a la elevada densidad de estructuras vasculares y epiteliales. Su función principal es iniciar el proceso de filtración del plasma sanguíneo.
- **Médula renal:** Localizada entre la corteza y la pelvis renal, la médula se compone de múltiples pirámides renales (en especies multilobuladas) o una masa medular continua (en especies unilobuladas). Aquí se encuentran los túbulos colectores, el asa de Henle y vasos rectos que desempeñan un papel crucial en el mecanismo de contracorriente, que permite concentrar la orina.
- **Pelvis renal:** Es una cavidad central en forma de embudo que recibe la orina desde los túbulos colectores y la canaliza hacia los uréteres. En animales como los bovinos, la pelvis está dividida en cálices renales que recogen la orina desde los lóbulos individuales (Villa, 2019).

Para comprender adecuadamente cómo el riñón lleva a cabo los procesos de filtración, reabsorción y excreción, es fundamental visualizar la organización general del órgano y su patrón de irrigación. La siguiente figura muestra de manera esquemática el recorrido del flujo sanguíneo renal, desde la entrada de sangre no filtrada hacia los glomérulos hasta su retorno al sistema venoso, así como el trayecto final de la orina hacia la vejiga. Esta representación facilita la comprensión de la distribución vascular y de la ubicación de las estructuras clave involucradas en la depuración sanguínea.



**Figura 27.** Estructura general del riñón y flujo sanguíneo renal

**Fuente:** Medina (2024)

Las características anatómicas y funcionales del riñón varían notablemente entre especies, reflejando adaptaciones específicas a sus necesidades fisiológicas, hábitos alimentarios y estrategias de conservación de agua. Estas diferencias influyen en la eficiencia del mecanismo de concentración urinaria, la arquitectura del parénquima renal y la forma general del órgano. La siguiente tabla presenta una comparación sintetizada de las principales particularidades renales en bovinos, perros y aves, permitiendo visualizar cómo estas adaptaciones condicionan la función excretora y homeostática en cada grupo animal.

**Tabla 23.** Comparación de Características Renales entre Especies

| Característica                       | Bovino                          | Perro                               | Ave                                       |
|--------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|
| <b>Tipo de riñón</b>                 | Multilobulado, lobulado externo | Unilobulado, liso                   | Unilobulado, liso                         |
| <b>Presencia de corteza y médula</b> | Sí, bien diferenciadas          | Sí, bien diferenciadas              | Sí, menos diferenciadas                   |
| <b>Presencia de pelvis renal</b>     | Solo en el riñón izquierdo      | Presente en ambos                   | Ausente, reemplazada por uréteres cónicos |
| <b>Presencia de cálices renales</b>  | Presentes                       | Ausentes                            | Ausentes                                  |
| <b>Presencia de papilas renales</b>  | Múltiples (cada lóbulo)         | Fusión en una sola papila (crestal) | Ausentes                                  |
| <b>Tipo de nefrona predominante</b>  | Cortical                        | Cortical y yuxtamedular             | Cortical                                  |

|                                            |                                         |                                     |                                                             |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| <b>Mecanismo de concentración urinaria</b> | Limitado (orina menos concentrada)      | Eficiente (ADH, asa de Henle larga) | Poco eficiente (poca capacidad de concentración)            |
| <b>Particularidades adicionales</b>        | Riñón derecho en contacto con el hígado | Riñones con cápsula fibrosa delgada | Presencia de uratos; excreción nitrogenada como ácido úrico |

**Fuente:** Adaptado de University of Basrah (2018)

Además de su arquitectura interna, la función renal depende críticamente de un flujo sanguíneo adecuado, pues el riñón recibe una fracción significativa del gasto cardíaco para permitir la filtración eficiente del plasma.

### **Irrigación renal**

La irrigación renal es fundamental para sostener las funciones de filtración, reabsorción y secreción propias del sistema renal. Cada riñón recibe sangre a través de una arteria renal, rama directa de la aorta abdominal, que se introduce en el hilio renal. Dentro del riñón, la arteria renal se ramifica en arterias interlobares que ascienden entre las pirámides renales, luego en arterias arcuatas que se curvan siguiendo el límite entre la corteza y la médula, y finalmente en arterias interlobulillares que irrigan las unidades funcionales corticales. Desde estas arterias interlobulillares emergen las arteriolas aferentes que conducen sangre hacia cada glomérulo (Cunningham & Klein, 2009).

En el glomérulo, la sangre es filtrada bajo una presión hidrostática elevada, un fenómeno posible gracias a la resistencia diferencial entre las arteriolas aferente y eferente. La sangre que no es filtrada abandona el glomérulo por la arteriola eferente, la cual se ramifica en capilares peritubulares que rodean los túbulos en las nefronas corticales, o en vasos rectos que descienden paralelos al asa de Henle en las nefronas yuxtamedulares. Esta disposición en dos redes capilares en serie (glomerular y peritubular/vasos rectos) constituye una circulación portal renal especializada que permite mantener la eficiencia de los procesos de intercambio tubular.

La presión relativamente alta en los capilares glomerulares favorece la filtración de plasma, mientras que la presión más baja en los capilares peritubulares promueve la reabsorción de agua y solutos desde el intersticio renal hacia la sangre. En particular, los vasos rectos desempeñan un papel esencial en la preservación del gradiente osmótico medular, imprescindible para la concentración urinaria mediante el mecanismo de contracorriente. Finalmente, la sangre venosa es recolectada por vénulas y venas interlobulillares, que convergen en venas arcuatas, interlobares y, por último, en la vena renal, la cual desemboca en la vena cava caudal (Cunningham & Klein, 2009).

Esta compleja organización vascular no solo sostiene el proceso continuo de depuración plasmática, sino que también facilita la regulación hemodinámica del riñón, ajustándose dinámicamente ante cambios en la presión arterial o en la composición del medio interno.

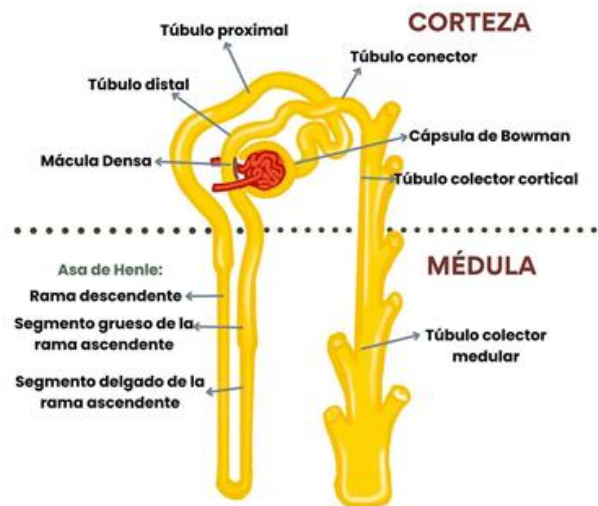
### **La nefrona: unidad estructural y funcional**

Cada riñón contiene entre cientos de miles a millones de nefronas, dependiendo de la especie. La nefrona consta de dos partes principales:

- **Corpúsculo renal:** Compuesto por el glomérulo (ovillo capilar) y la cápsula de Bowman, situada en la corteza. A través de la barrera de filtración glomerular (formada por endotelio fenestrado, membrana basal y podocitos) se genera el filtrado glomerular primario (Loutradis et al., 2021).
- **Túbulo renal:** A continuación de la cápsula de Bowman, se extiende a lo largo de la corteza y médula. Está dividido en túbulo contorneado proximal, asa de Henle (ramas descendente y ascendente), túbulo contorneado distal y túbulo colector (Carracedo & Ramírez, 2024).

Para comprender con claridad el funcionamiento renal y los procesos de filtración, reabsorción y secreción, es indispensable visualizar la organización anatómica de la nefrona, unidad estructural y funcional del riñón. La siguiente figura ilustra de manera esquemática los segmentos principales del nefrón, desde el

corpúsculo renal ubicado en la corteza hasta los trayectos del túbulo contorneado y el asa de Henle que desciende hacia la médula. Esta representación permite integrar la disposición espacial de cada región con sus funciones específicas, facilitando la comprensión de cómo el riñón mantiene la homeostasis hídrica, electrolítica y ácido-base del organismo.



**Figura 28.** Anatomía estructural de la nefrona

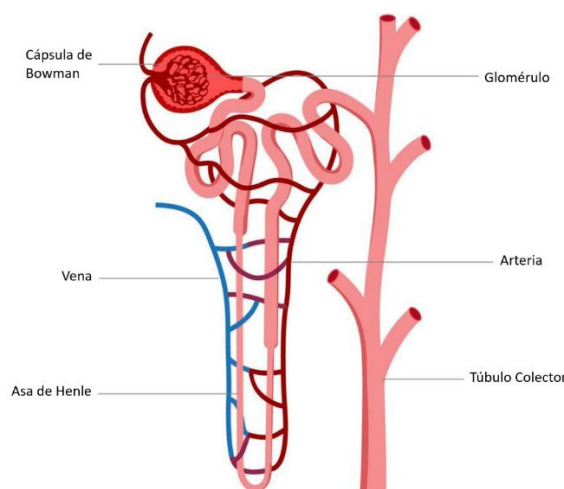
**Fuente:** Medina (2024)

### Partes de la nefrona

- **Glomérulo:** Conjunto de capilares sanguíneos derivados de la arteriola aferente y drenados por la arteriola eferente. La alta presión hidrostática glomerular favorece la salida de agua y solutos del plasma hacia la cápsula de Bowman (Cunningham & Klein, 2009).
- **Cápsula de Bowman:** Estructura epitelial que rodea al glomérulo. Recoge el ultrafiltrado glomerular, que contiene agua, electrolitos, urea, glucosa y pequeñas moléculas.
- **Túbulo contorneado proximal:** Segmento especializado en la reabsorción del 65-70% del filtrado, incluyendo agua, sodio, cloro, bicarbonato, glucosa, aminoácidos y vitaminas. Posee un epitelio cúbico con abundantes microvellosidades (borde en cepillo) que aumentan su superficie de absorción.

- **Asa de Henle:** Segmento en forma de U que desciende hacia la médula renal. Su rama descendente es permeable al agua y su rama ascendente es impermeable al agua pero permeable a los solutos, lo que establece un gradiente osmótico medular que permite la concentración de la orina.
- **Túbulo contorneado distal:** Participa en la reabsorción fina de sodio y cloro, regulada por la aldosterona, y en la secreción de potasio e hidrogeniones. Es importante en el ajuste final de la composición iónica del filtrado (Cunningham & Klein, 2009).
- **Túbulo colector:** Recibe el filtrado final y regula la reabsorción de agua bajo la influencia de la hormona antidiurética (ADH). En condiciones de deshidratación, la ADH aumenta la permeabilidad del túbulo colector al agua, concentrando la orina.

La eficiencia del proceso de filtración renal depende de una organización vascular altamente especializada que rodea al corpúsculo renal y a los túbulos de la nefrona. La siguiente figura muestra la disposición del flujo sanguíneo desde las arteriolas aferente y eferente hasta la red de capilares peritubulares y los vasos rectos, elementos fundamentales para sostener los gradientes de presión y osmolaridad que permiten la formación y concentración de la orina. Esta representación anatómica facilita comprender cómo se integran los mecanismos de filtración glomerular, reabsorción tubular y contracorriente medular dentro de un mismo circuito vascular funcional.



**Figura 29.** Organización vascular de la nefrona

**Fuente:** Allen (2020)

Existen dos tipos de nefronas:

- **Corticales:** Más numerosas, con asas cortas que penetran poco en la médula.
- **Yuxtamedulares:** Menos frecuentes, con asas de Henle largas que alcanzan la médula profunda. Estas son esenciales para la concentración urinaria gracias al sistema multiplicador de contracorriente (Hall & Hall, 2020).

En el polo vascular del corpúsculo renal se ubica el aparato yuxtaglomerular, compuesto por la mácula densa, las células granulares productoras de renina y las células mesangiales extraglomerulares (Cunningham & Klein, 2009). Este complejo regula la filtración glomerular y la presión arterial.

Para integrar la organización anatómica con la función renal, es necesario identificar el rol que desempeña cada segmento de la nefrona en el procesamiento del ultrafiltrado glomerular. La siguiente tabla sintetiza las principales estructuras que conforman la nefrona y describe sus funciones esenciales, desde la filtración inicial del plasma hasta la reabsorción selectiva de solutos y la concentración final de la orina. Esta visión comparativa permite comprender de manera clara cómo cada región contribuye de forma coordinada al mantenimiento de la homeostasis hídrica, electrolítica y ácido-base.

**Tabla 24.** Partes de la Nefrona y sus Principales Funciones

| Parte de la Nefrona                    | Función Principal                                                                                   |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Glomérulo</b>                       | Filtra el plasma sanguíneo, formando el ultrafiltrado glomerular libre de células y proteínas.      |
| <b>Cápsula de Bowman</b>               | Recoge el ultrafiltrado proveniente del glomérulo.                                                  |
| <b>Túbulo Contorneado Proximal</b>     | Reabsorbe el 65-70% del filtrado: agua, sodio, cloro, bicarbonato, glucosa, aminoácidos, vitaminas. |
| <b>Asa de Henle (rama descendente)</b> | Reabsorbe agua pasivamente, concentrando el filtrado.                                               |
| <b>Asa de Henle (rama ascendente)</b>  | Reabsorbe activamente sodio, cloro y potasio; impermeable al agua; diluye el filtrado.              |
| <b>Túbulo Contorneado Distal</b>       | Ajusta la reabsorción de sodio y cloro; regula el equilibrio ácido-base y la secreción de potasio.  |

|                                           |                                                                                                              |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Túbulo Colector Cortical y Medular</b> | Regula la reabsorción de agua bajo influencia de ADH; ajusta la reabsorción de sodio y secreción de potasio. |
| <b>Conducto Colector</b>                  | Concentra o diluye la orina final dependiendo de la presencia de ADH.                                        |

**Fuente:** Elaboración propia.

Una vez completados los procesos de filtración, reabsorción y secreción dentro de la nefrona, la orina debe ser transportada a través de un sistema de conductos que asegura su llegada al exterior del organismo.

### Vías Urinarias

El sistema de vías urinarias transporta la orina desde los riñones hacia el exterior del cuerpo. Está compuesto por:

- **Uréteres:** Conductos musculares que parten desde la pelvis renal y desembocan en la vejiga urinaria. La orina es impulsada mediante ondas peristálticas controladas por el sistema nervioso autónomo.
- **Vejiga urinaria:** Órgano hueco y distensible que almacena la orina hasta su eliminación voluntaria. Está revestida internamente por epitelio de transición y rodeada por músculo detrusor (Carracedo & Ramírez, 2024). Su capacidad varía según la especie y el tamaño del animal.
- **Uretra:** Canal de salida de la orina hacia el exterior. En los machos, también transporta el semen durante la eyaculación, por lo que forma parte del sistema urogenital. En las hembras, es más corta y termina en el vestíbulo vaginal.

## **Fisiología Renal: Procesos y Regulación**

El sistema renal actúa como un regulador dinámico de la homeostasis interna, ajustando el volumen y la composición del líquido extracelular, manteniendo el equilibrio ácido-base y regulando la presión arterial. A través de la formación de orina, los riñones eliminan productos metabólicos de desecho, conservan nutrientes esenciales y controlan el balance hídrico y electrolítico (Reece, 2015).

La producción de orina se lleva a cabo mediante tres procesos fundamentales: filtración glomerular, reabsorción tubular y secreción tubular, a los que se suma un cuarto mecanismo: la concentración o dilución de la orina. Todos estos procesos ocurren en la nefrona y son finamente regulados por mecanismos hormonales, neurales y locales.

Conociendo la estructura funcional de la nefrona, es posible comprender los procesos fisiológicos que ocurren en cada segmento, iniciando por la filtración glomerular.

### **Filtración Glomerular**

Loutradis et al. (2021) manifiestan que la filtración glomerular constituye el paso inicial y fundamental en la formación de la orina, llevándose a cabo en el corpúsculo renal, una unidad estructural conformada por el glomérulo y la cápsula de Bowman. Bajo la acción de la presión hidrostática glomerular, el plasma sanguíneo (exceptuando células y proteínas de gran tamaño) es forzado a atravesar una barrera de filtración altamente selectiva, compuesta por tres capas principales:

- 1. Endotelio capilar fenestrado**, que permite el paso de agua y solutos pequeños.
- 2. Membrana basal glomerular**, con propiedades de filtro físico y de carga, que restringe el tránsito de proteínas plasmáticas.
- 3. Hendiduras de filtración** entre los pedicelos de los podocitos, que constituyen el último filtro de alta selectividad.

El fluido que atraviesa esta barrera, denominado ultrafiltrado glomerular, posee una composición similar al plasma sanguíneo, aunque prácticamente exento de proteínas y elementos celulares, lo que resulta esencial para el proceso de depuración renal (Trimarchi, 2016).

### **Tasa de Filtración Glomerular (TFG)**

La Tasa de Filtración Glomerular (TFG) representa el volumen de ultrafiltrado generado por minuto en la suma de todos los glomérulos de ambos riñones, y constituye un parámetro clave para evaluar la función renal.

En condiciones fisiológicas normales, la TFG se mantiene relativamente constante gracias a mecanismos de autorregulación renal, que garantizan una filtración estable frente a fluctuaciones de la presión arterial (Franco et al., 1992).

Entre los principales mecanismos de autorregulación destacan:

- **Autorregulación Miogénica:**

La arteriola aferente responde a los cambios de presión mediante contracción o relajación reflejas:

- Si la presión arterial sistémica se eleva, la arteriola se contrae para evitar el aumento excesivo del flujo glomerular.
- Si la presión arterial disminuye, se dilata para mantener la perfusión glomerular.

Este reflejo intrínseco permite proteger la delicada estructura glomerular de daños hemodinámicos y preservar la eficiencia de filtración (Hall & Hall, 2020).

- **Retroalimentación Tubuloglomerular:**

El aparato yuxtaglomerular, a través de la mácula densa en el túbulo distal, detecta cambios en la concentración de sodio y cloro del filtrado:

- Concentraciones elevadas de NaCl sugieren un exceso de filtrado, lo que activa la liberación de adenosina para inducir vasoconstricción de la arteriola aferente, reduciendo la TFG.

- Concentraciones bajas estimulan la liberación de renina, promoviendo la formación de angiotensina II y la vasoconstricción de la arteriola eferente, con el objetivo de mantener la presión de filtración y restaurar la TFG.

### **Fuerzas de Starling en la Filtración Glomerular**

El proceso de filtración glomerular está determinado por el balance de las fuerzas de Starling, que actúan sobre la membrana de filtración:

- **Presión hidrostática glomerular** ( $\approx 60$  mmHg): favorece la salida de líquido del capilar hacia el espacio de Bowman.
- **Presión oncótica plasmática** ( $\approx 32$  mmHg): opone resistencia a la filtración, al atraer agua hacia el interior capilar.
- **Presión hidrostática en el espacio de Bowman** ( $\approx 18$  mmHg): también se opone a la salida de líquido.

El balance neto de estas fuerzas resulta en una presión de filtración efectiva que impulsa el ultrafiltrado hacia el túbulo renal.

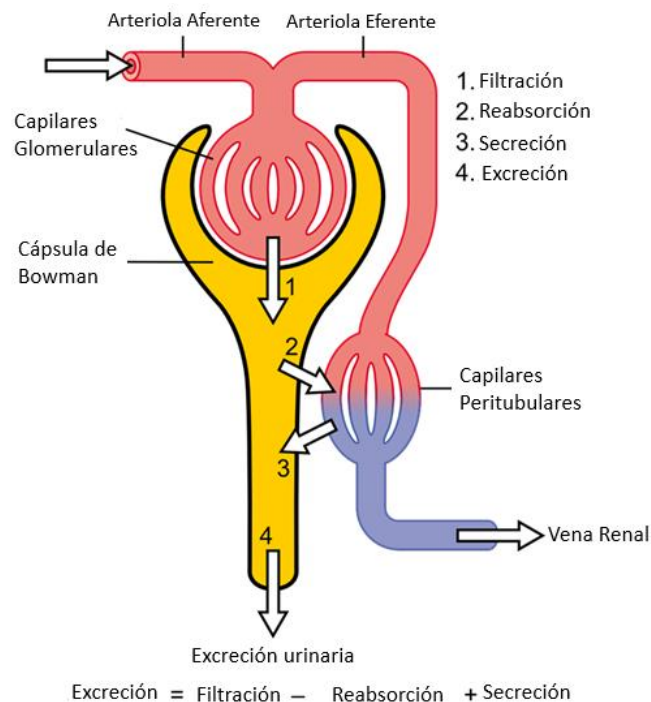
La elevación de la presión arterial sistémica tiende inicialmente a aumentar la TFG; sin embargo, la autorregulación miogénica limita este efecto mediante vasoconstricción de la arteriola aferente.

Por otro lado, una reducción significativa de la presión arterial disminuye la TFG; cuando la presión cae por debajo del rango de autorregulación ( $\sim 80$  mmHg), la filtración se ve severamente comprometida, pudiendo desencadenar estados de azoemia prerrenal o insuficiencia renal aguda si persiste.

La capacidad de los riñones para modular la TFG de forma autónoma constituye una herramienta crítica para la preservación de la homeostasis interna, garantizando una adecuada depuración sanguínea, la regulación del volumen extracelular y la estabilidad del medio interno.

El funcionamiento del sistema renal depende de una secuencia integrada de procesos que transforman el ultrafiltrado glomerular en orina definitiva. Estos procesos, filtración, reabsorción, secreción y excreción, actúan de manera

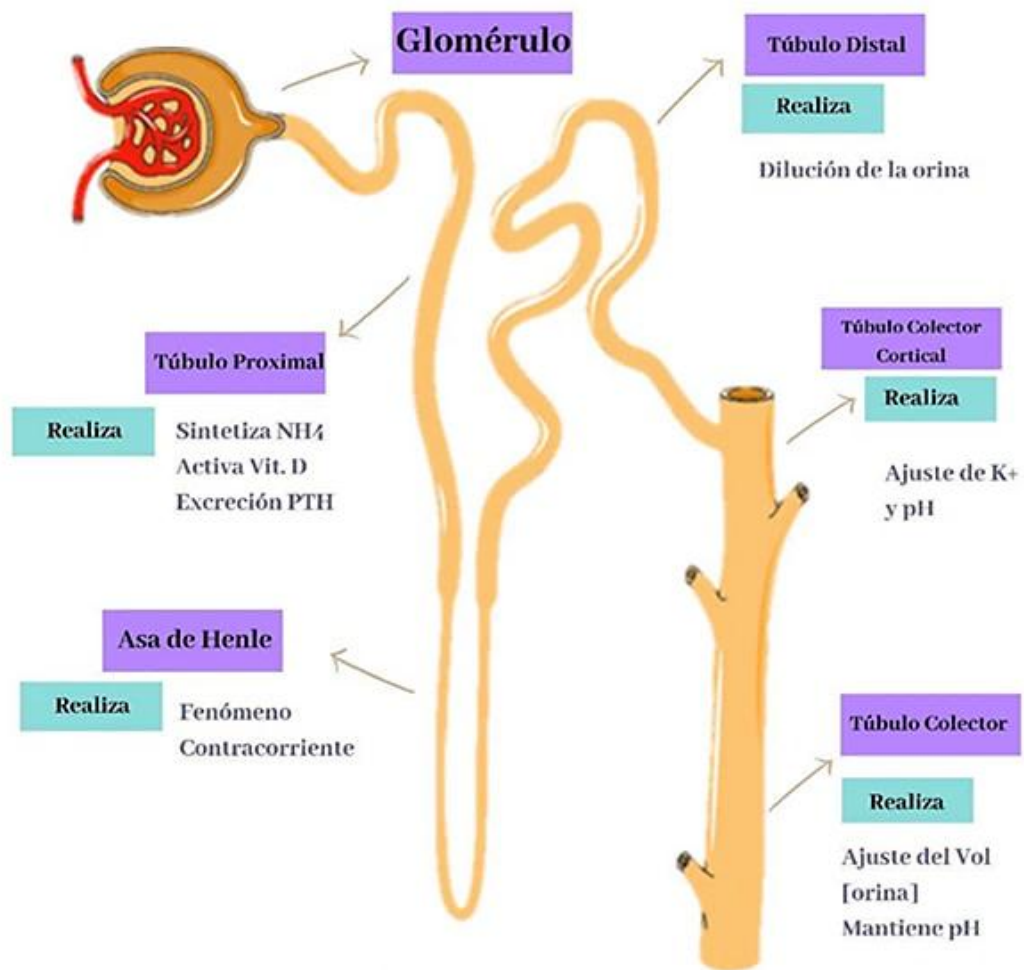
coordinada para regular el volumen de líquidos corporales, la composición electrolítica y el equilibrio ácido-base. La siguiente figura presenta de forma esquemática estos mecanismos funcionales esenciales, permitiendo visualizar cómo la sangre es filtrada en el glomérulo, cómo las sustancias útiles son recuperadas y cómo los desechos son finalmente eliminados del organismo.



**Figura 30.** Procesos funcionales clave en la fisiología renal

**Fuente:** Madhero88 (2016)

Cada segmento de la nefrona posee características anatómicas y funcionales específicas que determinan su contribución al procesamiento del filtrado glomerular. Desde el glomérulo hasta el túbulo colector, cada región participa en tareas como la reabsorción de agua y solutos, la secreción de compuestos, el ajuste del pH y la regulación del volumen corporal. La siguiente figura resume las funciones principales de cada segmento tubular, ofreciendo una visión clara de cómo estas estructuras trabajan de forma complementaria para mantener la homeostasis renal.



**Figura 31.** Funciones fisiológicas de los segmentos de la nefrona

**Fuente:** Hall & Hall (2020)

La filtración constituye únicamente el primer paso; la composición del ultrafiltrado será ampliamente modificada mediante procesos de recuperación selectiva de agua y solutos.

### Reabsorción y Secreción Tubular

Tras la filtración glomerular, el filtrado primario recorre los túbulos renales, donde es modificado sustancialmente mediante dos procesos complementarios: la reabsorción tubular y la secreción tubular. Estos procesos permiten la recuperación de sustancias esenciales para el organismo y la eliminación selectiva de desechos y

exceso de iones, ajustando finamente la composición final de la orina (Kunchur et al., 2024).

- **Reabsorción Tubular**

La reabsorción tubular consiste en el movimiento de agua y solutos desde el lumen tubular hacia el intersticio renal y finalmente hacia los capilares peritubulares. Este proceso puede ser activo (mediado por transporte de membrana que consume ATP) o pasivo (por gradientes de concentración o electroquímicos).

**Túbulo Contorneado Proximal (TCP):** El TCP es el principal sitio de reabsorción, recuperando aproximadamente el 65-70% del filtrado glomerular. Reabsorbe activamente sodio mediante bombas  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -ATPasa en la membrana basolateral, lo que impulsa la reabsorción secundaria de agua (por ósmosis) y otras sustancias como glucosa, aminoácidos, bicarbonato, cloro y fosfato (Reece, 2015). El epitelio del TCP presenta abundantes microvellosidades (borde en cepillo) que aumentan su superficie de absorción, y numerosas mitocondrias que abastecen energía para el transporte activo.

**Asa de Henle:** La rama descendente delgada es altamente permeable al agua pero impermeable a solutos, lo que permite la concentración del filtrado al perder agua hacia el intersticio medular hipertónico. La rama ascendente gruesa es impermeable al agua y realiza la reabsorción activa de sodio, potasio y cloro mediante el cotransportador NKCC2. Este transporte es esencial para generar el gradiente osmótico medular necesario para la concentración urinaria.

**Túbulo Distal (TCD) y Túbulo Colector:** El TCD ajusta de forma fina la reabsorción de sodio y cloro (por cotransportadores específicos) bajo la regulación de la aldosterona, y modula la secreción de potasio. En el túbulo colector, las células principales reabsorben sodio y agua (moduladas por aldosterona y ADH, respectivamente), mientras que las células intercaladas secretan o absorben iones hidrógeno y bicarbonato, participando activamente en el equilibrio ácido-base (Reece, 2015).

Es muy importante mencionar que, la reabsorción de algunas sustancias (como glucosa) presenta un límite máximo de transporte ( $T_m$ ). Cuando la concentración plasmática excede este límite, como ocurre en la diabetes mellitus, aparece glucosa en la orina (glucosuria).

Además de recuperar sustancias esenciales, el túbulo renal posee la capacidad de eliminar activamente metabolitos y compuestos exógenos hacia el lumen tubular, afinando el control del equilibrio interno.

- **Secreción Tubular**

La secreción tubular es el proceso mediante el cual ciertas sustancias son transportadas activamente desde los capilares peritubulares hacia el lumen tubular, completando su eliminación.

En el túbulo proximal, se secretan principalmente protones ( $H^+$ ) para la regulación del equilibrio ácido-base, así como compuestos orgánicos como creatinina, ácidos y bases endógenos o fármacos (Kunchur et al., 2024).

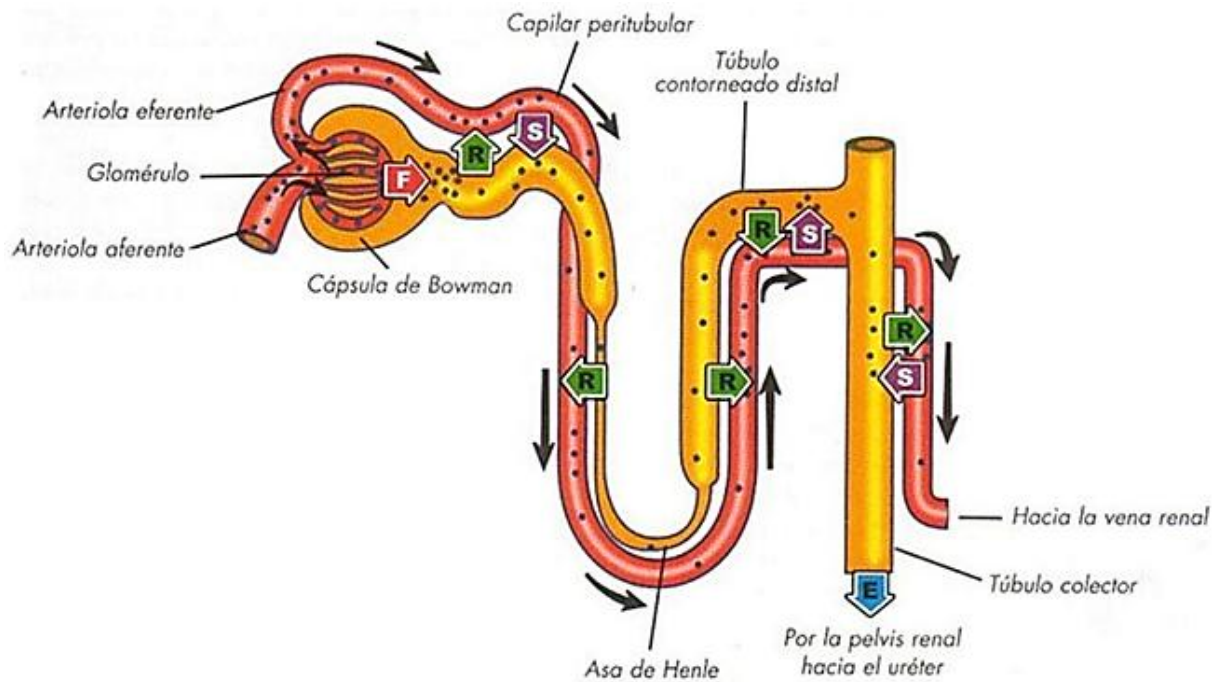
En el túbulo distal y colector, las células principales secretan potasio en intercambio con sodio, especialmente bajo la influencia de la aldosterona.

Las células intercaladas tipo A secretan activamente protones para corregir acidosis, mientras que las células tipo B pueden secretar bicarbonato en casos de alcalosis (Sjaastad et al., 2010).

La secreción tubular contribuye así no solo a la depuración de compuestos, sino también al ajuste fino del equilibrio ácido-base y electrolítico (Evangelista et al., 2022).

Para comprender de manera integral cómo el riñón modifica el ultrafiltrado a lo largo de su trayecto, en la Figura 32 se ilustra el recorrido tubular completo y los principales procesos funcionales asociados a cada segmento de la nefrona. Esta representación permite visualizar la secuencia ordenada de filtración, reabsorción y secreción, destacando cómo cada región tubular contribuye de forma específica al

ajuste final de la composición urinaria y al mantenimiento del equilibrio hidroelectrolítico del organismo.



**Fuente:** Mainez (2019)

**Figura 32.** Recorrido tubular y procesos funcionales de la nefrona

### Concentración y Dilución de la Orina

Una de las funciones más sofisticadas del sistema renal es su capacidad para ajustar la concentración de la orina, regulando así el balance hídrico del organismo en condiciones de deshidratación o sobrehidratación. Esta facultad depende de un delicado sistema de transporte de solutos y agua en los túbulos renales, y de la acción de mecanismos hormonales precisos.

- **Mecanismo de Contracorriente**

El gradiente osmótico medular es generado y mantenido gracias al mecanismo de contracorriente, basado en la disposición anatómica y funcional del asa de Henle y los vasos rectos peritubulares.

La rama descendente del asa de Henle es permeable al agua pero no a solutos, permitiendo la salida pasiva de agua hacia el intersticio hipertónico de la médula renal, concentrando así el fluido tubular.

En contraste, la rama ascendente gruesa es impermeable al agua pero reabsorbe activamente sodio, cloro y potasio mediante transportadores NKCC2, contribuyendo a incrementar la osmolaridad del intersticio (Fernández, 2000).

De forma complementaria, los vasos rectos funcionan como intercambiadores a contracorriente, minimizando la disolución del gradiente osmótico medular. Esta organización permite que el riñón conserve agua cuando es necesario o elimine grandes volúmenes de orina diluida en condiciones de exceso hídrico.

- **Regulación Fina del Volumen Urinario**

La concentración final de la orina resulta de un equilibrio dinámico entre: La cantidad de agua reabsorbida (regulada principalmente por la ADH) y la cantidad de solutos excretados, que depende de la función de los túbulos renales.

En condiciones de deshidratación, la secreción de ADH aumenta, la permeabilidad al agua en el túbulo colector se incrementa, y se produce una orina muy concentrada. Por el contrario, en situaciones de sobrehidratación, la liberación de ADH se inhibe, el túbulo colector se vuelve impermeable al agua, y se excreta una orina diluida con baja osmolaridad (Fernández, 2000).

Este sistema permite a los mamíferos ajustar la excreción urinaria para conservar agua o deshacerse del exceso, dependiendo de las condiciones internas y ambientales.

Estos procesos tubulares están modulados de manera precisa por mecanismos hormonales que ajustan la composición final de la orina y el volumen del líquido extracelular.

## **Regulación Hormonal y Neural del Sistema Renal**

El sistema renal actúa no solo como un órgano excretor, sino también como un regulador dinámico del equilibrio hídrico, electrolítico y ácido-base (Evangelista et al., 2022). Para cumplir esta función de manera eficiente, responde a señales hormonales y neurales que modulan el filtrado glomerular, la reabsorción tubular y la excreción urinaria, adaptándose a los requerimientos del medio interno (Reece, 2015). Esta regulación precisa permite mantener la presión arterial, el volumen plasmático, la osmolaridad y el pH dentro de rangos fisiológicos (Fernández, 2000).

### **Sistema Renina-Angiotensina-Aldosterona (RAA)**

El sistema renina-angiotensina-aldosterona (RAA) constituye un eje hormonal de vital importancia en la fisiología renal y cardiovascular. Su activación se desencadena ante condiciones que comprometen el equilibrio hemodinámico, como una disminución del volumen extracelular, una caída de la presión arterial o una baja concentración de sodio a nivel del túbulo distal. Este sistema regula de forma integral la presión arterial, el volumen plasmático y la reabsorción de sodio, actuando de manera sinérgica con otras hormonas como la ADH y los péptidos natriuréticos (Santeliz et al., 2008).

#### **Activación del sistema RAA**

El proceso se inicia cuando las células yuxtaglomerulares, localizadas en la pared de la arteriola aferente del glomérulo, detectan una disminución de la perfusión renal o una baja concentración de sodio en la mácula densa. En respuesta, liberan la enzima renina al torrente sanguíneo (Langston & Chalhoub, 2023).

La renina actúa sobre el angiotensinógeno, una proteína sintetizada por el hígado, transformándolo en angiotensina I, un péptido inactivo. Este es luego convertido en angiotensina II por acción de la enzima convertidora de angiotensina (ECA), presente principalmente en el endotelio pulmonar (Franco et al., 1992).

## Efectos fisiológicos de la angiotensina II

La angiotensina II es el principal efector del sistema RAA y ejerce múltiples acciones fisiológicas que favorecen la restauración del volumen y la presión arterial (Franco et al., 1992):

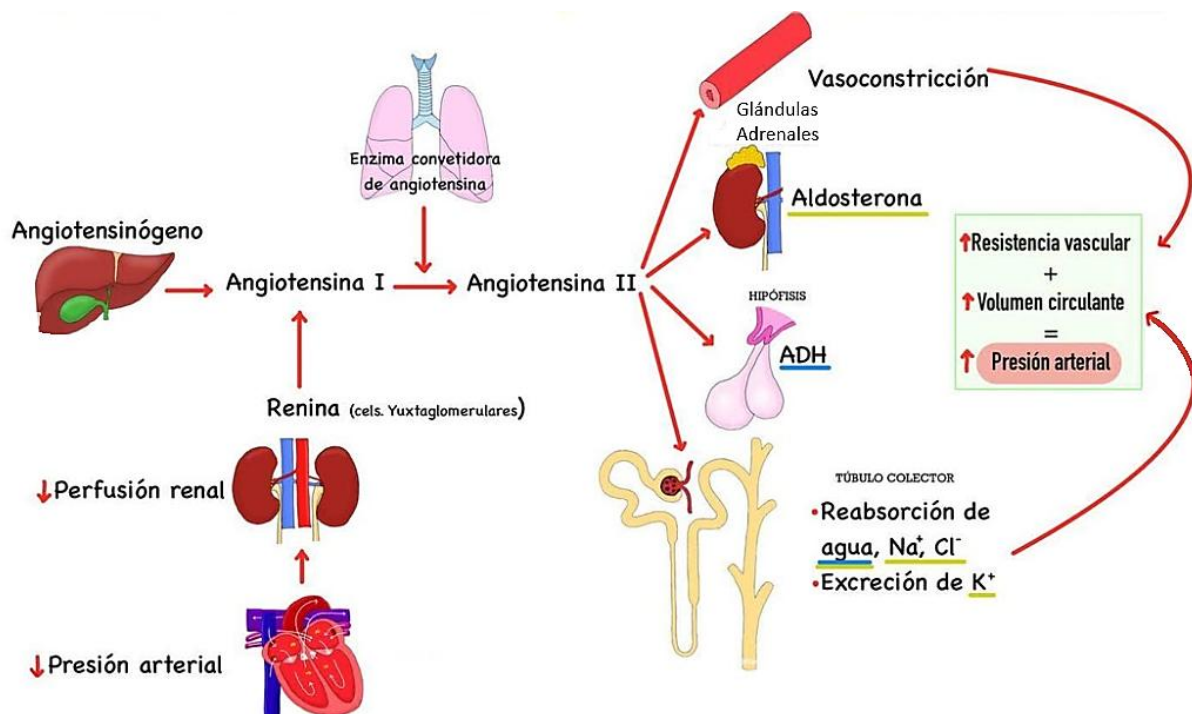
- **Vasoconstricción generalizada:** Incrementa la resistencia vascular periférica, elevando la presión arterial sistémica. A nivel renal, produce vasoconstricción de la arteriola eferente, ayudando a mantener la presión de filtración glomerular (TFG) aun en condiciones de bajo flujo sanguíneo (Langston & Chalhoub, 2023).
- **Estimulación de la corteza suprarrenal:** Induce la secreción de aldosterona, una hormona mineralocorticoide que actúa sobre el túbulo distal y el túbulo colector, promoviendo la reabsorción activa de sodio ( $\text{Na}^+$ ) y agua, así como la excreción de potasio ( $\text{K}^+$ ).
- **Estimulación del centro de la sed:** Aumenta el deseo de ingesta de agua, lo que contribuye a elevar el volumen plasmático.
- **Liberación de hormona antidiurética (ADH):** Estimula a la neurohipófisis a liberar ADH, lo que incrementa la reabsorción de agua en los túbulos colectores, reforzando aún más la conservación del volumen hídrico corporal (Acosta, 2015).

De esta forma, el sistema RAA actúa como un mecanismo compensatorio frente a la hipovolemia o hipotensión, asegurando el mantenimiento de una perfusión renal adecuada y del equilibrio hidroelectrolítico.

La activación del sistema renina-angiotensina-aldosterona (RAA) constituye uno de los mecanismos fundamentales de regulación hemodinámica y del equilibrio hidroelectrolítico. Su activación se desencadena principalmente por la disminución de la presión arterial o de la perfusión renal, lo que estimula a las células yuxtaglomerulares a liberar renina. Esta enzima convierte el angiotensinógeno hepático en angiotensina I, la cual es transformada en angiotensina II por la enzima convertidora de angiotensina (ECA) en los pulmones. La angiotensina II ejerce múltiples acciones fisiológicas, destacando la

vasoconstricción, la estimulación de la secreción de aldosterona y hormona antidiurética (ADH), el aumento de la reabsorción de sodio y agua y la activación del centro de la sed. En conjunto, estos efectos restauran la perfusión renal y elevan la presión arterial, permitiendo mantener la homeostasis cardiovascular.

Con el fin de contextualizar la regulación sistémica del funcionamiento renal, la Figura 33 muestra de manera esquemática la activación del sistema renina-angiotensina-aldosterona (RAA) y sus principales efectos fisiológicos. Esta ilustración permite comprender cómo la disminución de la perfusión renal desencadena una cascada hormonal dirigida a restaurar la presión arterial y el volumen circulante, resaltando la estrecha relación entre el riñón y el control hemodinámico general del organismo.



**Figura 33.** Activación y efectos del sistema renina-angiotensina-aldosterona (RAA)

**Fuente:** Hall & Hall (2020).

## **Hormona Antidiurética (ADH o Vasopresina)**

La hormona antidiurética (ADH), también conocida como vasopresina, es un péptido de nueve aminoácidos sintetizado en los núcleos supraóptico y paraventricular del hipotálamo. Tras su síntesis, se transporta a lo largo de los axones neuronales hasta la neurohipófisis, donde se almacena y se libera al torrente sanguíneo en respuesta a estímulos fisiológicos como el aumento de la osmolaridad plasmática o la disminución del volumen circulante efectivo (Acosta, 2015; Langston & Chalhoub, 2023).

### **Acción en el Túbulo Colector**

La ADH ejerce su principal efecto en las células principales del túbulo colector renal. Al unirse a los receptores  $V_2$  ubicados en la membrana basolateral de estas células, activa la vía del AMPc (adenosín monofosfato cíclico), promoviendo la inserción de canales de agua tipo acuaporina-2 (AQP2) en la membrana apical. Esta inserción aumenta de manera significativa la permeabilidad del túbulo colector al agua, permitiendo su reabsorción pasiva hacia el intersticio medular hipertónico, donde la elevada osmolaridad facilita el flujo osmótico de agua (Franco et al., 1992).

### **Efecto en la Osmolaridad y el Volumen Plasmático**

Mediante este mecanismo, la ADH concentra la orina y disminuye el volumen de excreción urinaria, conservando agua corporal y estabilizando tanto la osmolaridad plasmática como el volumen intravascular (Cáscales, 2019).. En ausencia de ADH, el túbulo colector permanece impermeable al agua, lo que resulta en la producción de grandes volúmenes de orina diluida. En contraste, en presencia de altos niveles de ADH, la orina puede alcanzar una elevada concentración, lo que es crucial en situaciones de deshidratación o hipovolemia para preservar la homeostasis hídrica (Franco et al., 1992).

Además de su acción renal, en concentraciones elevadas, la ADH también puede ejercer un efecto vasoconstrictor sobre el músculo liso vascular a través de

los receptores  $V_1$ , contribuyendo de manera secundaria al mantenimiento de la presión arterial en estados de choque hipovolémico (Acosta, 2015).

### **Péptidos Natriuréticos (ANP y BNP)**

Los péptidos natriuréticos son hormonas peptídicas producidas por el corazón como respuesta fisiológica a la sobrecarga de volumen. El péptido natriurético auricular (ANP) es sintetizado principalmente por las células de las aurículas, mientras que el péptido natriurético tipo B (BNP) se produce en los ventrículos, especialmente ante un aumento de la tensión parietal o dilatación cardíaca (Garza, 2008). Estas hormonas actúan como potentes reguladores del equilibrio hidroelectrolítico y de la presión arterial.

### **Efectos Renales**

- **Modulación del flujo glomerular:** El ANP y el BNP inducen vasodilatación de las arteriolas aferentes y vasoconstricción de las arteriolas eferentes, lo que incrementa la presión intraglomerular y, en consecuencia, la tasa de filtración glomerular (TFG), favoreciendo la eliminación de líquido (Reece, 2015).
- **Inhibición de la reabsorción tubular:** Estos péptidos disminuyen la reabsorción de sodio en los túbulos distales y colectores, mediante la inhibición de canales epiteliales de sodio (ENaC) y de la bomba  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -ATPasa, promoviendo así una mayor natriuresis y diuresis.
- **Supresión del eje renina-angiotensina-aldosterona (RAA):** Reducen la liberación de renina desde el aparato yuxtaglomerular y de aldosterona desde la glándula suprarrenal, contrarrestando la retención de sodio y agua inducida por este sistema hormonal.
- **Efectos hemodinámicos sistémicos:** A nivel vascular, los péptidos natriuréticos producen vasodilatación generalizada, disminuyendo la resistencia vascular periférica y, por ende, la presión arterial.

## Relevancia fisiológica

Estos péptidos funcionan como un sistema de retroalimentación negativa que limita la expansión excesiva del volumen plasmático y la hipertensión, ayudando a preservar la homeostasis cardiovascular y renal (Reece, 2015). Además, sus niveles plasmáticos son utilizados clínicamente como marcadores de insuficiencia cardíaca congestiva, dado que reflejan la magnitud de la sobrecarga ventricular.

## Control Neural

El sistema nervioso autónomo desempeña un papel esencial en la regulación dinámica de la función renal, modulando el flujo sanguíneo renal, la tasa de filtración glomerular (TFG), la secreción hormonal y la reabsorción tubular, especialmente en estados de estrés, hipovolemia o alteraciones hemodinámicas agudas (Silva et al., 2016). Esta interacción neural permite respuestas rápidas y adaptativas para mantener la homeostasis del volumen y la presión arterial.

## Inervación Simpática

La activación del sistema nervioso simpático renal tiene múltiples efectos fisiológicos:

- **Vasoconstricción renal:** La estimulación de fibras simpáticas provoca contracción de las arteriolas aferentes y eferentes, con mayor efecto sobre las aferentes, lo que reduce el flujo sanguíneo renal y disminuye la TFG. Esta respuesta prioriza la perfusión de órganos vitales como el corazón y el cerebro durante situaciones de emergencia o shock.
- **Estimulación de la liberación de renina:** Las terminales simpáticas, a través de receptores  $\beta_1$ -adrenérgicos en las células yuxtaglomerulares, promueven la secreción de renina. Esta hormona activa el sistema renina-angiotensina-aldosterona (RAA), favoreciendo la retención de sodio y agua para restaurar el volumen plasmático y la presión arterial (Reece, 2015).

- **Modulación de la reabsorción tubular:** A través de receptores  $\alpha$ -adrenérgicos presentes en las células tubulares proximales, el tono simpático incrementa la reabsorción activa de sodio, lo que facilita la retención de agua y contribuye a mantener el volumen circulante (Silva et al., 2016).

Estos mecanismos reflejan el rol crítico del sistema simpático en situaciones de emergencia, protegiendo la homeostasis frente a desequilibrios agudos.

### **Inervación Parasimpática**

La inervación parasimpática renal es relativamente escasa y de menor relevancia directa sobre la función de filtración o reabsorción tubular. Sin embargo, tiene participación en:

- **Regulación del tono vascular renal:** Puede contribuir de forma limitada a la modulación del flujo renal bajo condiciones específicas.
- **Control del vaciamiento vesical:** Facilita la relajación del esfínter uretral interno y la contracción del músculo detrusor durante la micción, favoreciendo la eliminación de la orina de manera coordinada (Reece, 2015).

### **Retroalimentación Aferente Renal**

Los riñones cuentan con fibras aferentes que monitorizan parámetros como la presión intrarrenal, la distensión de las vías urinarias y cambios en la composición del plasma (Reece, 2015). Esta información sensorial es transmitida hacia los centros de control cardiovascular en el sistema nervioso central, permitiendo:

- Ajustes reflejos del tono simpático sistémico.
- Modulación de la secreción de hormonas como renina.
- Coordinación de la respuesta hemodinámica frente a fluctuaciones agudas de volumen o presión.

Este mecanismo de retroalimentación constituye un eje fundamental en la integración entre la función renal y la regulación cardiovascular sistémica.

## **Funciones Endocrinas del Riñón**

Además de sus funciones excretoras y reguladoras, el riñón actúa como un órgano endocrino vital, participando activamente en la regulación sistémica de la homeostasis mediante la producción de hormonas y mediadores locales. Estas funciones endocrinas abarcan tanto la síntesis de hormonas clásicas de acción sistémica como la producción de factores paracrinos que modulan la función renal intrínseca.

### **Hormonas Clásicas**

- **Eritropoyetina (EPO)**

La eritropoyetina es una hormona glucoproteica producida principalmente por células intersticiales peritubulares de la corteza renal en respuesta a niveles reducidos de oxígeno en el tejido renal (hipoxia). Su función principal es estimular la eritropoyesis en la médula ósea, incrementando así la masa de eritrocitos y mejorando la capacidad de transporte de oxígeno sanguíneo (Reece, 2015). La disminución de la producción de EPO en patologías renales crónicas conduce a anemia renal.

- **Activación de la Vitamina D (Calcitriol)**

La vitamina D adquirida de la dieta o sintetizada en la piel es inicialmente convertida en el hígado a 25-hidroxivitamina D. Posteriormente, en el túbulo proximal renal, la enzima 1 $\alpha$ -hidroxilasa transforma este metabolito en 1,25-dihidroxivitamina D<sub>3</sub> (calcitriol), su forma biológicamente activa (Acosta, 2015). El calcitriol favorece la absorción intestinal de calcio y fósforo, regula el metabolismo óseo y el equilibrio mineral corpora, además modula

indirectamente la función de las glándulas paratiroides y el manejo renal de fosfato.

- **Secreción de Renina**

Aunque la renina es una enzima, su liberación por las células granulares del aparato yuxtaglomerular es considerada parte del rol endocrino renal. La renina cataliza la conversión de angiotensinógeno en angiotensina I, iniciando así el sistema renina-angiotensina-aldosterona (RAA), fundamental para la regulación de la presión arterial y el equilibrio hidrosalino (Acosta, 2015).

### **Mediadores Paracrinos y Autocrinos**

El riñón también produce mediadores locales que actúan de manera autocrina o paracrina para ajustar finamente su propio funcionamiento:

- **Prostaglandinas Renales ( $PGE_2$ ,  $PGI_2$ )**

Estas prostaglandinas, producidas principalmente en la médula renal, actúan como vasodilatadores locales, protegiendo el flujo sanguíneo renal frente a estímulos vasoconstrictores sistémicos (Acosta, 2015). Además, modulan la respuesta renal a la hormona antidiurética (ADH), contribuyendo a la regulación de la excreción de agua.

- **Óxido Nítrico (NO)**

Generado por el endotelio vascular renal, el óxido nítrico induce relajación del músculo liso de los vasos renales, favoreciendo el flujo sanguíneo glomerular y modulando la respuesta a vasoconstrictores como la angiotensina II (Reece, 2015).

- **Urodilatina**

La urodilatina es un péptido similar al péptido natriurético atrial (ANP), producido localmente en el túbulo distal. Actúa aumentando la excreción de

sodio y agua en los túbulos distales, contribuyendo al control del volumen extracelular de manera independiente del ANP sistémico (Reece, 2015).

Dado que estas funciones influyen en múltiples variables fisiológicas, el sistema renal mantiene interacciones estrechas con el sistema cardiovascular, respiratorio y endocrino.

## **Interacciones del Sistema Renal con Otros Sistemas**

El sistema renal no funciona de manera aislada, sino en constante interacción con otros sistemas fisiológicos. Esta colaboración es esencial para mantener la homeostasis del medio interno frente a cambios del entorno, actividad física, alimentación o patologías. A continuación, se detallan las relaciones más significativas con los sistemas cardiovascular, respiratorio y endocrino (Carracedo & Ramírez, 2024).

### **Relación con el Sistema Cardiovascular**

La integración renal y cardiovascular es fundamental para el control del volumen sanguíneo, la presión arterial y la perfusión tisular.

- **Flujo sanguíneo renal y TFG:** Los riñones reciben entre el 20-25% del gasto cardíaco, lo que garantiza una adecuada tasa de filtración glomerular (TFG), esencial para la depuración plasmática y la regulación del equilibrio hidroelectrolítico
- **Sistema Renina-Angiotensina-Aldosterona (RAA):** Ante hipotensión o hipovolemia, la liberación de renina desencadena una cascada que culmina en la vasoconstricción mediada por angiotensina II y la retención de sodio inducida por aldosterona (Reece, 2015).
- **Péptidos natriuréticos (ANP/BNP):** En respuesta a sobrecarga de volumen, el corazón libera ANP y BNP, los cuales inducen natriuresis, diuresis y

vasodilatación, contrarrestando la acción del sistema RAA (Sjaastad et al., 2016).

- **Presión arterial sostenida:** El riñón actúa como regulador a largo plazo de la presión arterial a través de la excreción urinaria de sodio (natriuresis de presión), modulando así el volumen extracelular (Cunningham & Klein, 2009).

**Ejemplo aplicado:** En la insuficiencia cardíaca, la reducción del flujo renal activa el sistema RAA, lo cual, si bien compensa a corto plazo, puede agravar la sobrecarga de volumen y el edema si persiste (Santeliz et al., 2008).

## **Relación con el Sistema Respiratorio**

Los riñones y los pulmones colaboran en el mantenimiento del equilibrio ácido-base, ajustando el pH sanguíneo en respuesta a trastornos metabólicos o respiratorios.

- **Compensación ácido-base:** Los riñones excretan protones ( $H^+$ ) y reabsorben bicarbonato ( $HCO_3^-$ ), contrarrestando así los cambios inducidos por alteraciones en la ventilación pulmonar (Bohr effect) (Fernández, 2000).
- **Hipoventilación e hiperventilación:** La retención de  $CO_2$  en hipoventilación genera acidosis respiratoria, que es compensada por el aumento renal de reabsorción de  $HCO_3^-$ ; lo opuesto ocurre en hiperventilación (Cunningham & Klein, 2009).
- **Producción de eritropoyetina:** En respuesta a hipoxia, como en enfermedades pulmonares crónicas, el riñón secreta eritropoyetina para aumentar la masa eritrocitaria, mejorando el transporte de oxígeno (Reece, 2015).

## **Relación con el Sistema Endocrino**

El sistema renal no solo responde a hormonas de origen sistémico, sino que también ejerce una función endocrina activa, siendo productor y modulador de hormonas con efectos locales y sistémicos.

- **Hormonas de Origen Renal:**

- Eritropoyetina (EPO): Producida por células intersticiales en respuesta a la hipoxia tisular, estimula la eritropoyesis en la médula ósea, aumentando la capacidad de transporte de oxígeno (Sjaastad et al., 2016).
- Calcitriol (1,25-dihidroxitamina D<sub>3</sub>): Forma activa de la vitamina D, sintetizada en el túbulo proximal renal. Regula la absorción intestinal de calcio y fósforo y participa en el metabolismo óseo y mineral.

- **Hormonas que Modulan la Función Renal:**

- Aldosterona: Incrementa la reabsorción de sodio y la excreción de potasio en el túbulo distal.
- Hormona Antidiurética (ADH): Regula la reabsorción de agua en los túbulos colectores según la osmolaridad del plasma.
- Péptidos Natriuréticos (ANP y BNP): Disminuyen la reabsorción de sodio y reducen el volumen plasmático.
- Parathormona (PTH): Modula la excreción renal de fosfato y la síntesis de calcitriol, afectando indirectamente la homeostasis del calcio (Sjaastad et al., 2016).

- **Eje Renal-Endocrino en la Homeostasis:** La acción concertada entre el riñón y el sistema endocrino permite al organismo responder eficazmente a situaciones como deshidratación, hipoxia, desequilibrios de calcio-fósforo o alteraciones tensionales. Esta sinergia ilustra la importancia del riñón como órgano sensorial, regulador y efector en múltiples ejes fisiológicos (Sjaastad et al., 2016).

- **Resumen**

El sistema renal es esencial para mantener la homeostasis mediante la regulación precisa del volumen y la composición de los líquidos corporales, el balance electrolítico, y el equilibrio ácido-base. Los riñones, como órganos clave de este sistema, realizan funciones vitales que incluyen la filtración de sangre, la formación y concentración de la orina, y la eliminación de productos metabólicos tóxicos.

La estructura anatómica renal comprende tres regiones principales: la corteza renal, donde predominan los glomérulos; la médula renal, formada por las pirámides renales y las asas de Henle, fundamentales en la concentración urinaria; y la pelvis renal, que colecta y dirige la orina hacia las vías excretoras.

La unidad funcional del riñón, la nefrona, realiza procesos clave: filtración glomerular, reabsorción tubular de sustancias esenciales, secreción de compuestos no deseados, y ajuste fino en la concentración de la orina mediante mecanismos contracorriente. La regulación de estos procesos se lleva a cabo a través de complejos mecanismos hormonales y neurales. Destacan entre estos el sistema renina-angiotensina-aldosterona (RAA), que ajusta la presión arterial y el volumen plasmático; la hormona antidiurética (ADH), crucial en la conservación de agua y control de la osmolaridad; y los péptidos natriuréticos, que promueven la excreción renal de sodio y agua.

Además de sus funciones excretoras, el riñón desempeña importantes roles endocrinos, como la producción de eritropoyetina para regular la eritropoyesis, y la activación de la vitamina D, que interviene en el metabolismo del calcio y fósforo.

Finalmente, el sistema renal interactúa estrechamente con los sistemas cardiovascular, respiratorio y endocrino, formando una red integrada de control homeostático que permite al organismo responder dinámicamente ante variaciones ambientales y fisiológicas, asegurando así el equilibrio interno vital para la supervivencia y función óptima de los organismos animales.

Las funciones del sistema renal permiten regular la composición química del plasma, el volumen sanguíneo y la presión arterial, variables que dependen directamente del sistema cardiovascular para su distribución y control hemodinámico. Esta relación íntima muestra que ningún mecanismo renal tendría efecto sin un sistema circulatorio capaz de transportar sangre, nutrientes, hormonas y productos de desecho. Por ello, el siguiente capítulo aborda el sistema cardiovascular y linfático como ejes de transporte y conexión entre todos los sistemas vistos hasta ahora.

## Actividades

### 1. Fundamentos Anatómicos y Conceptuales

a) ¿Qué es el sistema renal y por qué es esencial para mantener la homeostasis?

---

---

---

b) Describe detalladamente la estructura interna del riñón (corteza, médula y pelvis renal), y explica cómo contribuye cada región a la formación de la orina.

---

---

---

---

c) ¿Qué es la nefrona y cuáles son sus componentes principales? Explica la importancia funcional de cada uno.

---

---

---

---

---

---

### 2. Procesos Fisiológicos del Riñón

a) ¿Cómo ocurre la filtración glomerular y qué factores determinan la tasa de filtración glomerular (TFG)?

---

---

---

b) ¿Cuál es la importancia de la reabsorción tubular y la secreción en la formación definitiva de la orina?

---

---

---

c) ¿Cómo el mecanismo de contracorriente del asa de Henle permite concentrar la orina, y qué papel juega la hormona antidiurética (ADH)?

---

---

---

### **3. Mecanismos de Regulación Hormonal y Neural**

a) ¿Cómo actúa el sistema Renina-Angiotensina-Aldosterona (RAA) en respuesta a una disminución en la presión arterial o volumen sanguíneo?

---

---

---

---

b) ¿De qué manera la ADH y los péptidos natriuréticos regulan el balance hídrico y electrolítico?

---

---

---

---

- c) ¿Qué efectos tiene el sistema nervioso autónomo sobre la función renal y cómo afecta la filtración glomerular y la diuresis?

---

---

---

---

#### **4. Integración del Sistema Renal con Otros Sistemas Corporales**

- a) ¿Cómo se relaciona el sistema renal con el cardiovascular y respiratorio para mantener estable el equilibrio ácido-base?

---

---

---

---

- b) ¿De qué manera contribuye el riñón a la función endocrina, especialmente en la producción de eritropoyetina y en la activación de la vitamina D?

---

---

---

- c) Ilustra con ejemplos clínicos cómo las alteraciones renales afectan otros sistemas, destacando situaciones como la insuficiencia renal crónica.



## Taller

### **Actividad: Construcción de Mapas Conceptuales**

En grupos pequeños, discutan situaciones clínicas donde exista alteración renal (por ejemplo: insuficiencia renal aguda, alteraciones en la secreción hormonal o problemas de concentración urinaria). Elaboren un mapa conceptual integrador que incluya:

- Anatomía renal (estructura del riñón, nefrona)
- Procesos fisiológicos básicos (filtración glomerular, reabsorción, secreción y concentración urinaria)
- Regulación hormonal y neural (RAA, ADH, péptidos natriuréticos, sistema nervioso autónomo)
- Integración intersistémica (sistema cardiovascular, respiratorio, endocrino)
- Efectos de las alteraciones en la homeostasis corporal

## Glosario

1. **Riñón:** Órgano parenquimatoso que contiene la nefrona, responsable de la formación de la orina.
2. **Nefrona:** Unidad funcional del riñón que comprende el glomérulo, la cápsula de Bowman y el sistema tubular (proximal, asa de Henle, distal y colector).
3. **Filtración Glomerular:** Proceso mediante el cual el plasma sanguíneo se filtra a través del glomérulo para formar el filtrado glomerular.
4. **Tasa de Filtración Glomerular (TFG):** Medida de la cantidad de filtrado glomerular producido por minuto, indicador clave de la función renal.
5. **Reabsorción Tubular:** Proceso en el cual el túbulo renal reabsorbe agua, electrolitos y nutrientes esenciales de vuelta a la sangre.
6. **Secreción Tubular:** Proceso en el que compuestos adicionales son transferidos del filtrado sanguíneo al túbulo para su eliminación.
7. **Concentración de la Orina:** Mecanismo mediante el cual se regula la cantidad de agua reabsorbida en el túbulo colector, bajo la influencia de la ADH.
8. **Hormona Antidiurética (ADH):** Hormona que aumenta la permeabilidad de los túbulos colectores, promoviendo la reabsorción de agua y la formación de orina concentrada.
9. **Sistema Renina-Angiotensina-Aldosterona (RAA):** Sistema hormonal que regula el volumen sanguíneo y la presión arterial mediante la liberación de renina, angiotensina II y aldosterona.
10. **Renina:** Enzima liberada por el riñón en respuesta a la baja presión arterial, que inicia la cascada del RAA.
11. **Aldosterona:** Hormona que aumenta la reabsorción de sodio y agua en el túbulo distal, elevando la presión arterial.

12. **Péptidos Natriuréticos:** Hormonas producidas por el corazón que promueven la excreción de sodio y agua, contrarrestando el RAA.
13. **Compliance Renal:** Capacidad del riñón para adaptarse a cambios en el equilibrio de fluidos y electrolitos.
14. **Equilibrio Ácido-Base:** Mecanismos que mantienen el pH sanguíneo en un rango óptimo mediante la reabsorción de bicarbonato y la secreción de protones.
15. **Eritropoyetina (EPO):** Hormona producida por los riñones que estimula la producción de glóbulos rojos.
16. **Vitamina D Activa:** Forma de vitamina D activada en el riñón, esencial para el metabolismo del calcio.
17. **Uréter:** Conducto que transporta la orina desde el riñón hacia la vejiga.
18. **Vejiga:** Órgano de almacenamiento de la orina hasta su eliminación a través de la uretra.
19. **Uretra:** Conducto final por el cual la orina es expulsada del organismo.
20. **Contracorriente Multiplicador:** Mecanismo en el asa de Henle que genera un gradiente osmótico, esencial para la concentración de la orina.

## **CAPITULO V**

Sistema Cardiovascular y Linfático

## **Sistema Cardiovascular y Linfático**

En continuidad con el capítulo renal, el sistema cardiovascular distribuye el volumen sanguíneo regulado por el riñón hacia todos los tejidos, asegurando el aporte de oxígeno, nutrientes y hormonas, así como el retiro de productos metabólicos. Su funcionamiento preciso es esencial para que los ajustes renales y respiratorios se expresen adecuadamente en el organismo. El sistema linfático, a su vez, complementa esta función al mantener el equilibrio de líquidos y participar en la defensa inmunológica, consolidando la integración fisiológica global.

### **Introducción**

El sistema cardiovascular constituye un entramado funcional complejo y dinámico diseñado para mantener el equilibrio interno del organismo mediante el transporte eficiente de sustancias vitales. A través de la sangre, que es un fluido fisiológicamente activo, este sistema distribuye oxígeno, nutrientes, hormonas y otras moléculas esenciales hacia las células, y simultáneamente recoge productos metabólicos de desecho, como el dióxido de carbono, para su eliminación. Esta función de transporte es indispensable para la vida: la interrupción del flujo sanguíneo incluso por pocos segundos compromete el funcionamiento celular, especialmente en tejidos altamente sensibles como el cerebral, donde el daño puede ser irreversible en cuestión de minutos (Sjaastad et al., 2016).

El corazón, estructura central del sistema, actúa como una bomba muscular que impulsa la sangre en un circuito cerrado por medio de contracciones rítmicas coordinadas, mientras que los vasos sanguíneos dirigen este flujo hacia todos los tejidos y lo retornan al corazón. La circulación se organiza en dos circuitos en serie: la pulmonar, encargada del intercambio gaseoso, y la sistémica, que abastece a todos los órganos y sistemas. Esta arquitectura funcional permite un reparto eficiente de sangre y asegura que cada órgano reciba un aporte proporcional a sus necesidades fisiológicas (Reece, 2015).

Paralelamente, el sistema linfático actúa como un complemento indispensable del sistema cardiovascular. Está conformado por una red

especializada de vasos linfáticos, ganglios linfáticos y órganos linfoides (como el bazo, el timo y el tejido linfoide asociado a mucosas, MALT), que cumplen funciones críticas en el mantenimiento del equilibrio hídrico, la absorción intestinal de lípidos y la vigilancia inmunológica (Loukas et al., 2011). Este sistema recoge el exceso de líquido intersticial que no es reabsorbido por los capilares sanguíneos y lo devuelve a la circulación venosa, evitando así la formación de edemas. Además, actúa como filtro inmunológico, capturando y procesando antígenos a través de los ganglios linfáticos, donde se inician respuestas inmunitarias adaptativas, y facilitando la respuesta inmune celular y humoral (Acosta, 2015).

La interacción coordinada entre ambos sistemas, cardiovascular y linfático, es crucial para preservar la homeostasis fisiológica. Mientras el primero asegura la perfusión tisular y la distribución de sustancias, el segundo mantiene el balance de líquidos, participa en la absorción de grasas (vía los vasos quilíferos del intestino delgado) y garantiza una respuesta inmunitaria efectiva, detectando microorganismos invasores y productos tóxicos en la linfa. Esta sinergia se torna particularmente importante durante estados de estrés metabólico, inflamación, infecciones, ejercicio o alteraciones hemodinámicas, permitiendo al organismo adaptarse de forma eficiente a las demandas del medio interno y externo (Arias, 2012).

## **Objetivos**

- Describir la estructura y función del sistema cardiovascular y linfático.
- Analizar el ciclo cardíaco, la circulación y la regulación del gasto cardíaco y la presión arterial.
- Explicar el papel del sistema linfático en el drenaje de líquidos, absorción y transporte de lípidos y la inmunidad.
- Comprender la integración funcional entre los sistemas cardiovascular y linfático en el mantenimiento de la homeostasis.
- Reconocer las principales interacciones del sistema cardiovascular-linfático con otros sistemas fisiológicos.

## **Preguntas de Enfoque**

1. ¿Cómo logra el corazón bombear la sangre en un circuito cerrado de manera unidireccional, y por qué es importante que la sangre fluya siempre en la dirección correcta?
2. ¿De qué manera se regulan el ritmo cardíaco y la presión arterial para asegurar que los tejidos reciban un flujo sanguíneo adecuado bajo diferentes condiciones (reposo, ejercicio, cambios posturales, etc.)?
3. Si gran parte del plasma que sale de los capilares es reabsorbido por los mismos vasos sanguíneos, ¿por qué se necesita un sistema linfático que recoja el líquido sobrante? ¿Qué ocurriría si este sistema fallara?
4. ¿Cómo contribuye el sistema linfático a la defensa del organismo frente a infecciones, y cuál es su relación con el sistema circulatorio sanguíneo?

## **Anatomía del Sistema Cardiovascular**

### **Componentes y Organización General**

El sistema cardiovascular está compuesto por tres elementos principales: el corazón, que actúa como una bomba central; la sangre, que es el medio de transporte fisiológico; y una extensa red de vasos sanguíneos, las arterias, capilares y venas, que canalizan su flujo en un circuito cerrado y altamente regulado (Reece, 2015).

Este circuito consta de dos subdivisiones: la circulación pulmonar (o menor), que transporta sangre del corazón a los pulmones para el intercambio gaseoso, y la circulación sistémica (o mayor), que distribuye sangre oxigenada desde el corazón hacia todos los tejidos del cuerpo y devuelve sangre desoxigenada. Estas circulaciones están dispuestas en serie, pero el flujo a cada órgano en la circulación sistémica ocurre en arreglo paralelo, lo cual permite que cada región reciba sangre arterial directamente desde la aorta o sus ramas, conservando así la calidad del

contenido oxigenado y minimizando la pérdida progresiva de nutrientes entre órganos (Cunningham & Klein, 2009).

Los vasos sanguíneos cumplen funciones especializadas según su tipo:

- Las arterias conducen la sangre a alta presión desde el corazón hacia los tejidos.
- Las arteriolas regulan el flujo mediante contracción del músculo liso, siendo los principales determinantes de la resistencia periférica.
- Los capilares permiten el intercambio de gases, nutrientes y desechos gracias a su estructura de una sola capa de endotelio.
- Las vénulas y venas transportan la sangre de regreso al corazón y actúan como reservorios de volumen gracias a su alta distensibilidad (Hall & Hall, 2020).

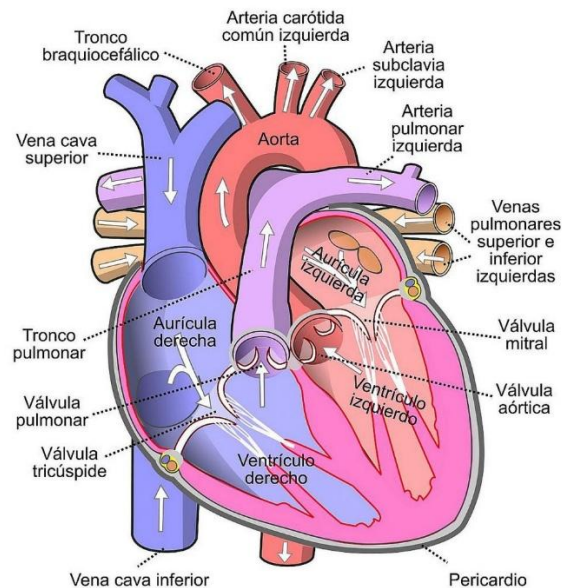
Para comprender las diferencias funcionales entre los distintos tipos de vasos sanguíneos, la Tabla 25 presenta una comparación estructural y fisiológica entre arterias, venas y capilares. Esta síntesis permite visualizar cómo las características de sus paredes, la presión del flujo y la presencia o ausencia de válvulas se relacionan directamente con su función dentro del sistema circulatorio, asegurando un transporte eficiente de sangre y el adecuado intercambio de sustancias a nivel tisular.

**Tabla 25.** Comparación estructural y funcional entre arterias, venas y capilares

| <b>Característica</b>        | <b>Arterias</b>                      | <b>Venas</b>                            | <b>Capilares</b>          |
|------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------|
| <b>Tipo de sangre</b>        | Oxigenada (excepto arteria pulmonar) | Desoxigenada (excepto venas pulmonares) | Mezcla para intercambio   |
| <b>Presión</b>               | Alta                                 | Baja                                    | Muy baja                  |
| <b>Paredes</b>               | Gruesas y elásticas                  | Delgadas con válvulas                   | Una capa endotelial       |
| <b>Presencia de válvulas</b> | No                                   | Sí                                      | No                        |
| <b>Función principal</b>     | Transporte hacia tejidos             | Retorno al corazón                      | Intercambio de sustancias |

**Fuente:** Adaptado de Universidad Estatal de Milagro (2012)

Complementando esta información, la Figura 34 muestra la anatomía interna del corazón, destacando sus cavidades, válvulas y principales vasos asociados. Esta representación facilita la comprensión del recorrido de la sangre a través del corazón y evidencia cómo la disposición anatómica garantiza un flujo unidireccional, coordinado y adaptado a las demandas hemodinámicas del organismo.



**Figura 34.** Anatomía interna del corazón: cavidades, válvulas y grandes vasos

**Fuente:** Wapcaplet (2006)

### El Corazón y su Arquitectura Funcional

El corazón es un órgano muscular hueco que impulsa la sangre en dos circuitos separados mediante contracciones rítmicas. En mamíferos y aves, está dividido en cuatro cavidades: dos aurículas y dos ventrículos, separadas por válvulas unidireccionales que impiden el reflujo de sangre (Boeta et al., 2018). Esta configuración anatómica asegura una separación total entre la sangre oxigenada (izquierda) y la desoxigenada (derecha), optimizando la eficiencia del transporte.

En contraste, los reptiles poseen un corazón tricameral (dos aurículas y un ventrículo parcialmente dividido), y los peces, un corazón bicameral (una aurícula y

un ventrículo), reflejando adaptaciones evolutivas al entorno y a la fisiología del metabolismo (Reece, 2015).

### Cavidades y Válvulas Cardíacas

- **Aurícula derecha:** recibe la sangre desoxigenada desde la circulación sistémica.
- **Aurícula izquierda:** recibe sangre oxigenada desde los pulmones.
- **Ventrículo derecho:** eyecta sangre hacia los pulmones.
- **Ventrículo izquierdo:** impulsa la sangre hacia la aorta y el resto del cuerpo.

Entre estas cavidades, se encuentran las válvulas cardíacas que controlan el flujo sanguíneo:

La Tabla 26 resume la ubicación y la función principal de las válvulas cardíacas, elementos esenciales para mantener la dirección correcta del flujo sanguíneo durante el ciclo cardíaco. Esta tabla permite relacionar cada válvula con la cavidad que conecta y con el mecanismo fisiológico que regula, reforzando la importancia de estas estructuras para la eficiencia circulatoria y la prevención del reflujo sanguíneo.

**Tabla 26.** Válvulas cardíacas: ubicación anatómica y función principal

| Válvula                   | Ubicación                                       | Función principal                                 |
|---------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| <b>Mitral (bicúspide)</b> | Entre aurícula izquierda y ventrículo izquierdo | Impide el reflujo hacia la aurícula               |
| <b>Tricúspide</b>         | Entre aurícula derecha y ventrículo derecho     | Evita el retorno de sangre durante la contracción |
| <b>Aórtica</b>            | Entre ventrículo izquierdo y aorta              | Permite el paso hacia la circulación sistémica    |
| <b>Pulmonar</b>           | Entre ventrículo derecho y arteria pulmonar     | Dirige la sangre hacia los pulmones               |

**Fuente:** Adaptado de López (2020)

Además, el tabique interventricular e interauricular separan las mitades derecha e izquierda, impidiendo la mezcla de sangre oxigenada y desoxigenada.

## Irrigación y Drenaje Cardíaco

Debido a su intensa actividad, el corazón requiere un abastecimiento constante de oxígeno. Este se logra a través de las arterias coronarias, que emergen de la aorta en su raíz proximal:

- **Arteria coronaria izquierda:** Irriga principalmente la aurícula izquierda, el ventrículo izquierdo y el septo interventricular anterior.
- **Arteria coronaria derecha:** Irriga la aurícula derecha, ventrículo derecho y parte del nodo sinoauricular.

El drenaje del miocardio se realiza a través del seno coronario, que recoge la sangre desoxigenada y la retorna a la aurícula derecha (Sjaastad et al., 2016).

Comprender la organización general de la circulación permite ahora analizar con mayor detalle las características estructurales de los vasos sanguíneos. Estas diferencias anatómicas explican por qué cada segmento vascular cumple funciones específicas en la regulación del flujo y la presión.

## Vasos Sanguíneos: Estructura Comparativa

El sistema de vasos sanguíneos constituye una red jerárquica encargada de transportar la sangre desde el corazón hacia los tejidos y viceversa. Se divide en tres tipos principales: arterias, venas y capilares.

### Arterias

Las arterias transportan sangre desde el corazón hacia los órganos. En la mayoría de los casos (excepto en la arteria pulmonar), llevan sangre oxigenada. Poseen una estructura robusta compuesta por tres capas (Sjaastad et al., 2016):

- **Túnica íntima** (interna): Endotelio simple que facilita el paso laminar de la sangre.

- **Túnica media** (media): Rica en músculo liso y fibras elásticas, regula el diámetro del vaso.
- **Túnica adventicia** (externa): Tejido conectivo que proporciona soporte estructural.

Esta estructura permite que las arterias soporten presiones elevadas y mantengan un flujo continuo, aun entre latidos.

## **Venas**

Las venas retornan la sangre hacia el corazón. Aunque transportan sangre desoxigenada en la mayoría de los casos (excepto las venas pulmonares), su principal característica es su baja presión interna y paredes más delgadas que las arterias. Contienen válvulas venosas que evitan el retroceso de la sangre, especialmente en las extremidades (Blázquez, 2012).

## **Capilares**

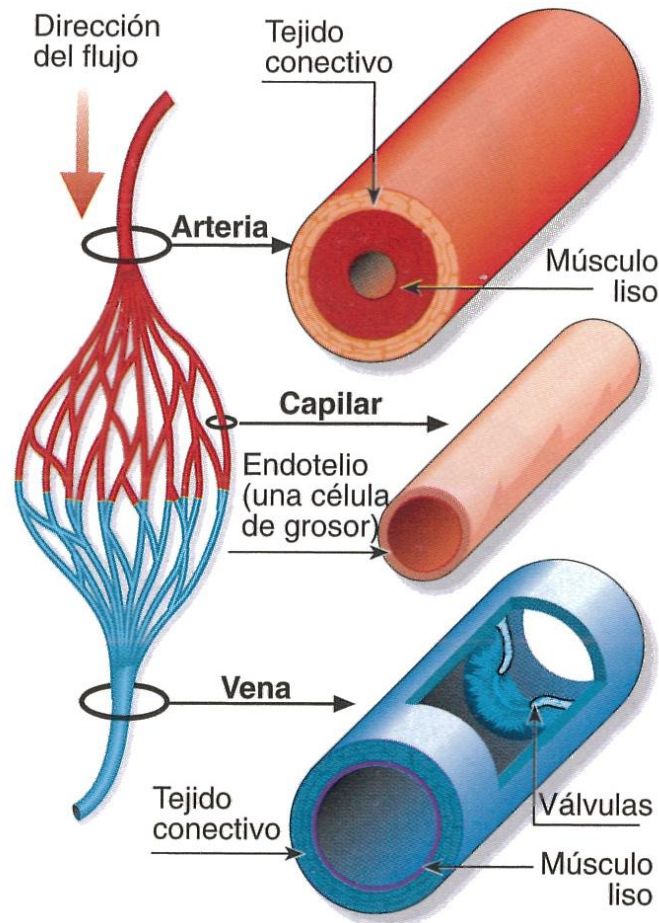
Los capilares representan la porción más delgada y extensa del sistema circulatorio. Su estructura está formada únicamente por una capa de células endoteliales, lo que permite el intercambio bidireccional de gases, nutrientes, hormonas y productos de desecho (González, 2019).

Este intercambio está regido por la ley de Fick, según la cual:

- A mayor área de superficie y mayor diferencia de concentración, mayor será la difusión.
- A menor grosor de la membrana, mayor eficiencia en el intercambio.

La Figura 35 ilustra de manera clara la estructura comparativa de arterias, venas y capilares, permitiendo visualizar cómo las diferencias en el grosor de sus paredes, la presencia de músculo liso o válvulas, y el tipo de tejido conectivo se relacionan directamente con sus funciones hemodinámicas. Esta representación

facilita la comprensión de cómo cada vaso está especializado para soportar presiones distintas, regular el flujo sanguíneo o permitir el intercambio de sustancias a nivel tisular.



**Figura 35.** Estructura comparativa de arterias, venas y capilares

**Fuente:** Aguilas (2024)

### Composición y Función de la Sangre

La sangre constituye el fluido vital que circula por el sistema cardiovascular, actuando como el principal medio de transporte de sustancias esenciales y desempeñando funciones críticas para el mantenimiento de la homeostasis (Sjaastad et al., 2016). Está compuesta por una fracción líquida, el plasma, y una fracción celular, que incluye eritrocitos, leucocitos y plaquetas. Además de servir como vehículo para el oxígeno y los nutrientes, la sangre interviene en la defensa inmunológica, la regulación térmica, la hemostasia y la comunicación hormonal.

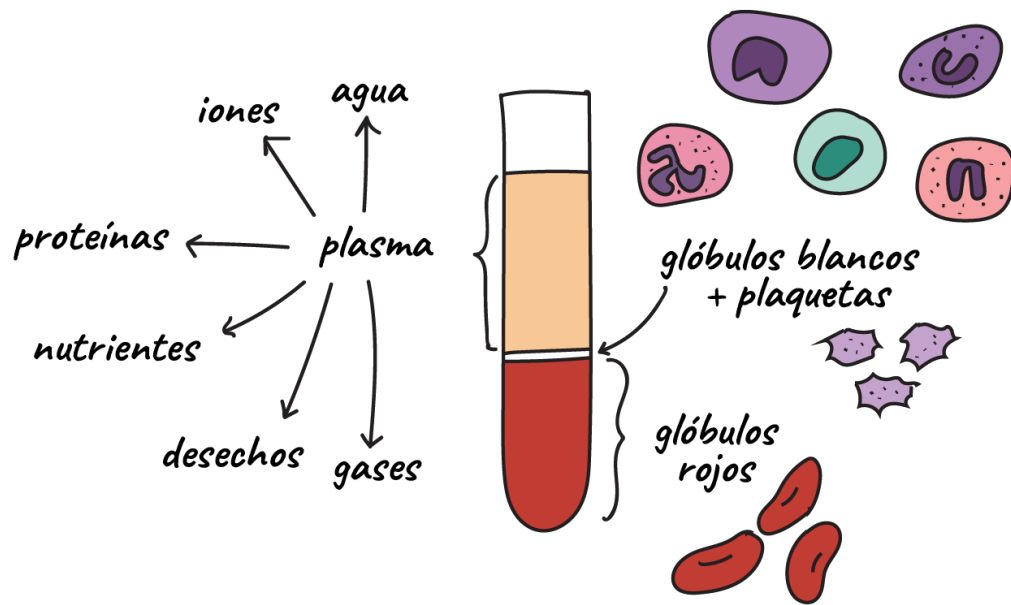
Para comprender mejor la naturaleza del fluido que circula a través de estos vasos, la Tabla 27 presenta la composición básica de la sangre y la proporción aproximada de cada uno de sus componentes. Esta síntesis permite apreciar la relevancia funcional del plasma como medio transportador, de los eritrocitos como células encargadas del transporte gaseoso y de los leucocitos y plaquetas como elementos clave en la defensa y reparación tisular.

**Tabla 27.** Composición de la Sangre

| <b>Componente</b>                                              | <b>Proporción aproximada</b> | <b>Funciones principales</b>                                                                            |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Plasma (agua, proteínas, electrolitos, gases disueltos)</b> | 55%                          | Transporte de nutrientes, desechos, hormonas, gases; regulación osmótica y térmica                      |
| <b>Eritrocitos (glóbulos rojos)</b>                            | 44%                          | Transporte de oxígeno (O <sub>2</sub> ) y dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) mediante la hemoglobina |
| <b>Leucocitos (glóbulos blancos)</b>                           | <1%                          | Defensa inmunológica innata y adaptativa                                                                |
| <b>Plaquetas (trombocitos)</b>                                 | <1%                          | Participación en la coagulación sanguínea y reparación vascular                                         |

**Fuente:** Adaptado de Montalvo Arenas (2018)

Complementariamente, la Figura 36 muestra la separación de los elementos sanguíneos tras la centrifugación, resaltando visualmente la distribución del plasma, los glóbulos rojos y la fracción leucocitaria-plaquetaria. Esta representación gráfica permite relacionar la composición de la sangre con su organización física, facilitando la comprensión de cómo cada fracción contribuye a las funciones esenciales del sistema cardiovascular.



**Figura 36.** Composición de la sangre y sus elementos formes tras la centrifugación

**Fuente:** Khan Academy (2020).

### Transporte de Gases Respiratorios

La hemoglobina contenida en los eritrocitos permite el transporte eficiente del oxígeno desde los pulmones hacia los tejidos, y del dióxido de carbono desde los tejidos hacia los pulmones. El oxígeno se une de manera reversible a los grupos hemo, mientras que el  $\text{CO}_2$  se transporta mayoritariamente como ion bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) en el plasma, además de unirse a proteínas plasmáticas y a la hemoglobina en menor proporción (Sjaastad et al., 2016).

### Regulación del Tono Vascular: El Papel del Endotelio y la Sangre

El endotelio vascular no solo actúa como una barrera selectiva, sino también como un órgano endocrino que modula activamente el flujo sanguíneo y la presión arterial (Alvarado, 2013). Entre los mediadores más relevantes producidos por las células endoteliales se encuentran:

1. **Óxido Nítrico (NO):** Es un vasodilatador clave sintetizado a partir de la L-arginina por la enzima óxido nítrico sintasa endotelial (eNOS). Su liberación se estimula por el aumento del flujo sanguíneo (estrés de cizallamiento) y por señales químicas como la acetilcolina y la bradicinina (Reece et al., 2015). El NO difunde hacia el músculo liso vascular, activando la guanilato ciclasa y promoviendo la relajación muscular, con lo cual se reduce la resistencia vascular y se incrementa el flujo sanguíneo local.
2. **Prostaglandinas (PGI<sub>2</sub>):** Derivadas del ácido araquidónico, las prostaglandinas como la prostaciclina (PGI<sub>2</sub>) tienen efectos vasodilatadores y antiagregantes plaquetarios. Contribuyen a mantener un flujo sanguíneo adecuado y a prevenir la formación de trombos (Reece, 2015).
3. **Endotelina-1 (ET-1):** Es uno de los vasoconstrictores más potentes conocidos. Su liberación se incrementa en condiciones de hipoxia, estrés hemodinámico y estimulación simpática. La ET-1 aumenta la resistencia vascular periférica y participa en la regulación fina de la presión arterial (Reece, 2015).
4. **Factores procoagulantes y anticoagulantes:** El endotelio regula la hemostasia mediante la producción de factores que activan o inhiben la coagulación, como el factor tisular, la trombomodulina y el óxido nítrico. Las plaquetas circulantes también juegan un papel clave en este equilibrio (Reece, 2015).

La Tabla 28 sintetiza los principales moduladores vasculares de origen endotelial, destacando su papel clave en el equilibrio entre vasodilatación, vasoconstricción, coagulación y antiagregación. Estos mediadores, como el óxido nítrico, la prostaciclina, la endotelina-1 y el factor tisular, permiten comprender cómo el endotelio regula dinámicamente el tono vascular y la hemostasia, ajustándose a las demandas metabólicas del organismo y respondiendo eficazmente ante lesiones o cambios en el flujo sanguíneo.

**Tabla 28.** Principales moduladores vasculares de origen endotelial

| <b>Molécula</b>                        | <b>Tipo de acción</b>        | <b>Efecto principal</b>       | <b>Mecanismo de acción</b>                       |
|----------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------|
| <b>Óxido nítrico (NO)</b>              | Vasodilatador                | Disminuye presión arterial    | Relajación del músculo liso vía GMPc             |
| <b>Prostaciclina (PGI<sub>2</sub>)</b> | Vasodilatador, antiagregante | Previene trombosis            | Inhibe activación plaquetaria                    |
| <b>Endotelina-1 (ET-1)</b>             | Vasoconstrictor              | Aumenta presión arterial      | Contracción del músculo liso vía IP <sub>3</sub> |
| <b>Trombomodulina</b>                  | Anticoagulante               | Inactiva trombina             | Activación de la proteína C                      |
| <b>Factor tisular</b>                  | Procoagulante                | Inicia cascada de coagulación | Activación de la vía extrínseca                  |

**Fuente:** Adaptado de Arranz et al. (2018)

### **Función Hemodinámica y Reológica**

La viscosidad de la sangre, su volumen total y su distribución afectan directamente la presión arterial y el retorno venoso. Factores como la concentración de hematocritos, la hidratación y la velocidad del flujo determinan la resistencia al paso de la sangre en vasos de diferentes calibres (Franco et al., 1992).

Además, las células sanguíneas interactúan continuamente con el endotelio, participando en la inflamación, la reparación vascular y la respuesta inmunitaria. La sangre no es solo un fluido de transporte, sino un componente activo y dinámico en la regulación fisiológica del sistema cardiovascular (Franco et al., 1992).

Además de actuar como medio de transporte, la sangre cuenta con mecanismos especializados para mantener la integridad del sistema vascular. La hemostasia integra respuestas vasculares, plaquetarias y plasmáticas que evitan la pérdida excesiva de sangre tras una lesión, sin comprometer la fluidez del sistema circulatorio.

## Hemostasia y Factores de Coagulación

La hemostasia es el proceso fisiológico mediante el cual el organismo detiene una hemorragia tras una lesión vascular. Este mecanismo es esencial para preservar la integridad del sistema circulatorio y se compone de una serie de eventos coordinados que involucran vasos sanguíneos, plaquetas (trombocitos), factores plasmáticos de coagulación y sistemas de control anticoagulante (González et al., 2020).

Se distinguen tres fases principales:

### Fase 1: Hemostasia primaria (respuesta plaquetaria)

Esta fase inicia inmediatamente después de una lesión vascular (Reece, 2015).

- **Vasoconstricción local:** Las células endoteliales dañadas liberan sustancias como endotelina que provocan contracción del músculo liso vascular.
- **Adhesión plaquetaria:** Las plaquetas se adhieren al colágeno expuesto en la zona lesionada mediante el factor de Von Willebrand (vWF).
- **Activación plaquetaria:** Las plaquetas liberan sustancias como ADP, serotonina y tromboxano A<sub>2</sub>, que aumentan la agregación plaquetaria.
- **Formación del tapón plaquetario:** Las plaquetas activadas se agregan formando una masa que reduce la pérdida de sangre.

### Fase 2: Hemostasia secundaria (coagulación)

Esta fase implica una cascada de reacciones enzimáticas que culminan en la formación de una red de fibrina que refuerza el tapón plaquetario (Reece, 2015).

Existen dos vías principales de activación, que convergen en una vía común:

La Tabla 29 resume las dos vías principales de activación de la coagulación, intrínseca y extrínseca, y los componentes que intervienen en cada una. Su presentación permite visualizar de manera clara cómo distintos estímulos, ya sea el

contacto con superficies cargadas o la liberación del factor tisular, convergen en una misma vía final que culmina en la formación de fibrina. Esto facilita la comprensión integrada del proceso coagulativo, esencial para mantener la estabilidad vascular tras una lesión.

**Tabla 29.** Vías de Activación de la Coagulación y sus Principales Componentes

| Vía                   | Activación                                                   | Componentes clave                                |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| <b>Vía intrínseca</b> | Por contacto con colágeno o superficies cargadas             | Factores XII, XI, IX, VIII                       |
| <b>Vía extrínseca</b> | Por activación del factor tisular (TF) en células lesionadas | Factor VII y complejo TF-VIIa                    |
| <b>Vía común</b>      | Confluencia de ambas vías                                    | Factores X, V, II (protrombina), I (fibrinógeno) |

**Fuente:** Adaptado de Alvarado (2013)

La trombina (factor IIa) juega un papel central, ya que convierte el fibrinógeno soluble en fibrina insoluble, la cual forma una red que estabiliza el coágulo (Reece, 2015).

### Fase 3: Fibrinólisis y regulación

Una vez sellada la lesión, el organismo activa mecanismos que degradan el coágulo para restaurar el flujo normal (González et al., 2020)

- **Plasmina:** Enzima derivada del plasminógeno que disuelve la red de fibrina.
- **Anticoagulantes naturales:** Antitrombina III, proteína C y proteína S regulan la actividad de los factores de coagulación, previniendo una coagulación excesiva.
- **Óxido nítrico (NO) y prostaciclina (PGI<sub>2</sub>):** Producidos por el endotelio, inhiben la adhesión y agregación plaquetaria.

## Factores de Coagulación: Clasificación y Funcione

Los factores de coagulación se designan con números romanos (I al XIII) y se activan secuencialmente en la cascada. Algunos actúan como enzimas, otros como cofactores o sustratos (González et al., 2020)

**Tabla 30.** Factores de la Coagulación: Nombre y Función Principal

| <b>Factor</b> | <b>Nombre</b>                         | <b>Función principal</b>                     |
|---------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|
| <b>I</b>      | Fibrinógeno                           | Precursor de la fibrina                      |
| <b>II</b>     | Protrombina                           | Se convierte en trombina                     |
| <b>III</b>    | Tromboplastina o factor tisular       | Activa la vía extrínseca                     |
| <b>IV</b>     | Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ )           | Cofactor esencial en múltiples etapas        |
| <b>V</b>      | Proacelerina                          | Cofactor de la vía común                     |
| <b>VII</b>    | Proconvertina                         | Activa la vía extrínseca                     |
| <b>VIII</b>   | Anti-hemofílico A                     | Cofactor en la vía intrínseca                |
| <b>IX</b>     | Anti-hemofílico B (Christmas)         | Activa el factor X en la vía intrínseca      |
| <b>X</b>      | Factor Stuart-Prower                  | Inicia la vía común                          |
| <b>XI</b>     | Antecedente tromboplástico plasmático | Activa el factor IX                          |
| <b>XII</b>    | Factor de Hageman                     | Activa el XI e inicia la fibrinólisis        |
| <b>XIII</b>   | Factor estabilizador de la fibrina    | Estabiliza el coágulo con enlaces covalentes |

**Fuente:** Adaptado de Interlab México (2020)

### Importancia Clínica y Veterinaria

- **Deficiencias congénitas:** Algunas especies animales presentan hemofilia A (deficiencia del factor VIII) o B (factor IX), generando hemorragias espontáneas (Alvarado, 2013).
- **Intoxicaciones por anticoagulantes:** Muchos rodenticidas actúan bloqueando la vitamina K, necesaria para sintetizar factores II, VII, IX y X.
- **Evaluación clínica:** Se utilizan pruebas como el tiempo de protrombina (TP), el tiempo de tromboplastina parcial activado (TTPa) y el tiempo de coagulación para evaluar estos procesos en animales enfermos (Sjaastad et al., 2016)..

## **Fisiología del Sistema Cardiovascular**

El sistema cardiovascular es el pilar funcional de la distribución de sustancias vitales (como oxígeno, nutrientes y hormonas) y de la eliminación de productos metabólicos de desecho. Su funcionamiento depende de la acción coordinada del corazón, los vasos sanguíneos y los mecanismos de control neural y hormonal que ajustan la actividad según las demandas fisiológicas del organismo (Sjaastad et al., 2016).

### **Ciclo Cardíaco y Contracción del Miocardio**

El ciclo cardíaco comprende todos los eventos que ocurren en un solo latido, alternando entre contracción (sístole) y relajación (diástole) (Reece, 2015). Este proceso permite el flujo ordenado de sangre y garantiza el abastecimiento de oxígeno y nutrientes.

#### **Fases del ciclo cardíaco**

Para comprender plenamente la función de bombeo del corazón, es indispensable analizar el ciclo cardíaco, es decir, la secuencia ordenada de eventos mecánicos que permiten el llenado y la expulsión de sangre en cada latido. Este proceso, estrechamente sincronizado con los mecanismos eléctricos del miocardio, asegura que la sangre fluya de manera eficiente hacia los pulmones y el resto del organismo. Cada latido incluye fases de contracción y relajación cuidadosamente coordinadas, cuyo entendimiento es fundamental para interpretar fenómenos hemodinámicos, leer electrocardiogramas y comprender alteraciones clínicas asociadas. La siguiente tabla resume las fases principales del ciclo cardíaco y sus resultados fisiológicos.

La Tabla 31 organiza de manera precisa las fases del ciclo cardíaco y sus efectos fisiológicos principales, permitiendo visualizar cómo la alternancia entre sístole y diástole asegura un flujo sanguíneo eficiente hacia los pulmones y el resto del organismo. Esta síntesis facilita comprender la relación entre los eventos mecánicos del corazón y su respuesta hemodinámica, aspecto esencial para

interpretar el funcionamiento normal del sistema cardiovascular y las posibles alteraciones clínicas asociadas.

**Tabla 31.** Fases del Ciclo Cardíaco: Evento fisiológico y resultado principal

| Fase            | Evento fisiológico                              | Resultado principal                               |
|-----------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| <b>Sístole</b>  | Contracción de los ventrículos                  | Expulsión de sangre a la aorta y arteria pulmonar |
| <b>Diástole</b> | Relajación y llenado de las cavidades cardíacas | Preparación para el siguiente latido cardíaco     |

**Fuente:** Adaptado de Alvarado (2013)

La secuencia eléctrica que precede a la contracción está cuidadosamente sincronizada para asegurar una contracción eficaz y eficiente del miocardio.

### **Coordinación Eléctrica:**

- **Nódulo sinoauricular (SA):** Marcapasos natural que inicia el impulso.
- **Nódulo auriculoventricular (AV):** Retarda brevemente el impulso antes de su paso al ventrículo.
- **Haz de His y fibras de Purkinje:** Distribuyen rápidamente el impulso en ambos ventrículos (Reece, 2015).

### **Electrocardiograma (ECG)**

El ECG registra esta actividad eléctrica mediante electrodos. Sus principales ondas son:

La Tabla 32 resume las ondas fundamentales del electrocardiograma y su significado fisiológico, proporcionando una guía clara para interpretar la actividad eléctrica del corazón. Al relacionar cada onda con los eventos de despolarización y repolarización auricular o ventricular, esta tabla sirve como un apoyo visual clave

para comprender el origen eléctrico del latido cardíaco y su utilidad diagnóstica en la detección de arritmias, bloqueos y trastornos de la conducción.

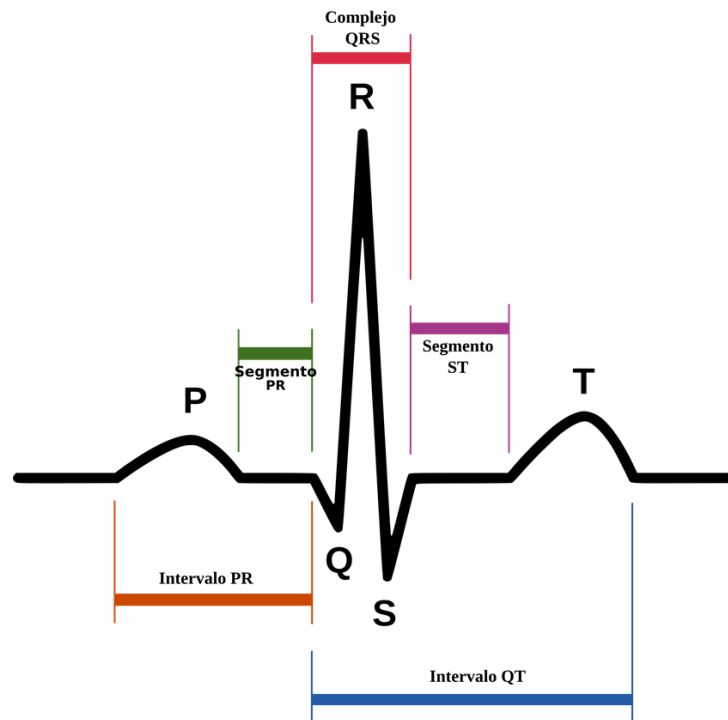
**Tabla 32.** Ondas del Electrocardiograma (ECG) y su Significado Fisiológico

| Onda         | Significado                 |
|--------------|-----------------------------|
| Onda P       | Despolarización auricular   |
| Complejo QRS | Despolarización ventricular |
| Onda T       | Repolarización ventricular  |

**Fuente:** Adaptado de Departamento de Fisiología (2008)

La evaluación del ECG permite detectar alteraciones en la conducción, isquemia, hipertrofias y arritmias (Sjaastad et al., 2016).

La Figura 37 presenta el trazado electrocardiográfico normal con la identificación de sus ondas, segmentos e intervalos, lo cual permite comprender de manera visual la secuencia eléctrica que coordina el latido cardíaco. Este esquema facilita la interpretación clínica del ECG al mostrar cómo cada deflexión corresponde a eventos específicos de despolarización y repolarización auricular y ventricular, constituyendo una herramienta esencial para el diagnóstico de alteraciones del ritmo, bloqueos de conducción y anomalías cardíacas estructurales.



**Figura 37.** Trazado electrocardiográfico normal con sus ondas, segmentos e intervalos.

**Fuente:** Quizlet (2019)

## Circulación Sistémica y Pulmonar

El sistema cardiovascular se divide funcionalmente en dos circuitos:

- **Circulación sistémica:** Transporta sangre oxigenada desde el ventrículo izquierdo a todo el cuerpo y retorna sangre desoxigenada a la aurícula derecha (Sjaastad et al., 2016).
- **Circulación pulmonar:** Conduce sangre desoxigenada desde el ventrículo derecho a los pulmones para el intercambio gaseoso, retornando sangre oxigenada a la aurícula izquierda (Sjaastad et al., 2016).

La Tabla 33 compara de forma clara y sintética las características fundamentales de la circulación sistémica y pulmonar, destacando sus diferencias en cuanto al ventrículo de origen y la función fisiológica que desempeñan. Esta distinción es crucial para entender cómo el corazón distribuye la sangre oxigenada

hacia los tejidos a través de la circulación sistémica, mientras que la circulación pulmonar permite la oxigenación sanguínea en los pulmones. La tabla sirve como una guía conceptual que facilita la comprensión de la doble bomba cardíaca y su importancia para el mantenimiento del intercambio gaseoso y la homeostasis.

**Tabla 33.** Comparación entre la Circulación Sistémica y Pulmonar

| Tipo de circulación | Ventrículo de origen | Función principal                                           |
|---------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------|
| Sistémica           | Izquierdo            | Distribuye O <sub>2</sub> y nutrientes a tejidos corporales |
| Pulmonar            | Derecho              | Intercambio gaseoso en pulmones                             |

**Fuente:** Adaptado de Castillo & Del Pozo (2018)

### Gasto Cardíaco

El gasto cardíaco (GC) es el volumen de sangre que el corazón expulsa hacia la circulación sistémica en un minuto. Representa un parámetro central de la función cardiovascular, ya que determina la cantidad de oxígeno y nutrientes disponible para los tejidos. El gasto cardíaco se calcula utilizando la fórmula:

$$GC = VolumenSistólico(VS) \times FrecuenciaCardíaca(FC)$$

Donde:

- **Volumen sistólico (VS):** Es la cantidad de sangre expulsada por el ventrículo en cada latido, usualmente expresado en mililitros (mL).
- **Frecuencia cardíaca (FC):** Número de latidos del corazón por minuto.

Por ejemplo, en un perro grande en reposo, un volumen sistólico de 30 mL y una frecuencia de 100 latidos/minuto darían un gasto cardíaco de 3.000 mL/min, o 3 L/min.

## Factores que Determinan el Gasto Cardíaco

El gasto cardíaco está influenciado por varios factores fisiológicos y patológicos:

- **Precarga:** Representa el volumen de sangre que llena los ventrículos al final de la diástole. A mayor precarga (mayor volumen telediastólico), mayor será la distensión de las fibras miocárdicas, aumentando la fuerza de contracción (Ley de Frank-Starling).
- **Poscarga:** Es la resistencia que el ventrículo debe vencer para expulsar la sangre. Un aumento de la poscarga, como ocurre en la hipertensión arterial, puede reducir el volumen sistólico si el corazón no se adapta.
- **Contractilidad:** Capacidad intrínseca del miocardio para contraerse de manera independiente de la precarga y la poscarga. Puede ser aumentada por estímulos simpáticos o por ciertos fármacos inotrópicos positivos.
- **Frecuencia Cardíaca:** Un aumento de la frecuencia incrementa el gasto cardíaco hasta cierto punto, pero si la frecuencia es demasiado alta, puede reducir el llenado ventricular (diástole abreviada) y disminuir el volumen sistólico.

Estos factores interactúan de forma dinámica, ajustándose a las necesidades metabólicas del organismo.

## Presión Arterial

La presión arterial (PA) es la fuerza que ejerce la sangre contra las paredes de las arterias y es fundamental para la perfusión adecuada de los tejidos (Suárez et al., 2012). Desde el punto de vista fisiológico, la presión arterial media (PAM) depende de dos grandes variables:

$$PAM = GC \times ResistenciaVascularPeriférica(RVP)$$

- **Gasto Cardíaco (GC):** Como vimos, depende del VS y de la FC.

- **Resistencia Vascular Periférica (RVP):** Es la resistencia que ofrece el lecho vascular al paso de la sangre, principalmente regulada a nivel de las arteriolas.

Por tanto, una disminución en el gasto cardíaco o una reducción de la resistencia vascular puede disminuir la presión arterial, mientras que un aumento en cualquiera de estos factores tiende a elevarla (Sjaastad et al., 2016).

### **Mecanismos de Regulación de la Presión Arterial**

El cuerpo utiliza varios mecanismos para mantener la presión arterial dentro de un rango óptimo:

- **Regulación Neural:** Mediada por el sistema nervioso autónomo (Suárez et al., 2012)..

El sistema simpático aumenta la frecuencia cardíaca, la contractilidad y provoca vasoconstricción, elevando la presión arterial.

El sistema parasimpático (vagal) disminuye la frecuencia cardíaca y favorece una ligera vasodilatación.

- **Regulación Hormonal:**

**Sistema Renina-Angiotensina-Aldosterona (RAA):** Se activa en situaciones de disminución de la presión o volumen sanguíneo, produciendo vasoconstricción y retención de sodio y agua.

**Péptidos natriuréticos (ANP y BNP):** Secretados en respuesta al aumento de la presión o volumen, favorecen la eliminación de sodio y agua, reduciendo la presión arterial.

**Vasopresina (ADH):** Incrementa la reabsorción de agua en el riñón y provoca vasoconstricción.

- **Mecanismos Reflejos:**

**Barorreceptores:** Detectan cambios agudos en la presión arterial y ajustan rápidamente la actividad simpática y parasimpática.

- **Quimiorreceptores:** Responden a alteraciones en los niveles de oxígeno, dióxido de carbono y pH, contribuyendo a la regulación cardiovascular, especialmente en situaciones de hipoxia o acidosis.
- **Regulación a Largo Plazo:** A través del ajuste del volumen de líquido extracelular, principalmente por mecanismos renales.

### **Intercambio Capilar: Difusión, Filtración y Reabsorción**

El intercambio de líquidos y solutos entre la sangre y los tejidos ocurre principalmente en los capilares, vasos sanguíneos de pared muy delgada. Este proceso es esencial para el transporte de oxígeno, dióxido de carbono, nutrientes, hormonas y productos de desecho, y se sustenta en dos mecanismos principales: la difusión de solutos y el movimiento de líquidos regulado por las Presiones de Starling (Dezube, 2023).

### **Difusión de Solutos: La Ley de Fick**

La difusión es el movimiento pasivo de moléculas desde áreas de mayor concentración hacia áreas de menor concentración. En los capilares, este proceso permite el intercambio de gases respiratorios, glucosa, aminoácidos y otras moléculas pequeñas (Carpenter & Marion, 2023).

Este fenómeno se describe con la Ley de Fick:

$$\text{Tasa de difusión} \propto \frac{\text{Área de intercambio} \times \text{Diferencia de concentración}}{\text{Grosor de la membrana}}$$

Factores que favorecen la difusión:

- **Alta densidad capilar:** Incrementa el área de intercambio.

- **Pared capilar delgada:** Reduce la barrera que deben atravesar las moléculas.
- **Fuerte gradiente de concentración:** Aumenta la diferencia entre la concentración de solutos en la sangre y en el tejido (Martinez, 1994).

### **Movimiento de Líquidos: Presiones de Starling**

El paso del líquido a través de la pared capilar se regula por el equilibrio entre fuerzas hidrostáticas y osmóticas, denominadas Presiones de Starling. Estas fuerzas determinan si el líquido se filtra hacia el espacio intersticial o se reabsorbe hacia el capilar (Brandys, 2022).

Principales presiones implicadas:

- **PHc - Presión hidrostática capilar:** Es la presión que ejerce la sangre dentro del capilar sobre su pared. Favorece la salida del líquido desde el capilar hacia el espacio intersticial (filtración). Es mayor en el extremo arterial del capilar (~35 mmHg).
- **PHi - Presión hidrostática intersticial:** Es la presión que ejerce el líquido del espacio intersticial contra la pared del capilar. Puede ser ligeramente negativa o cercana a cero, y generalmente se opone a la filtración (Suárez et al., 2012).
- **$\pi_c$  - Presión oncótica capilar:** Es la presión osmótica generada por las proteínas plasmáticas (especialmente albúmina) en la sangre. Atrae agua hacia el interior del capilar, promoviendo la reabsorción. Su valor promedio es de ~25 mmHg (Suárez et al., 2012).
- **$\pi_i$  - Presión oncótica intersticial:** Es la presión osmótica generada por proteínas presentes en el espacio intersticial. Es baja (cerca de 1-3 mmHg), pero favorece la salida de líquido desde el capilar hacia el intersticio (Suárez et al., 2012).

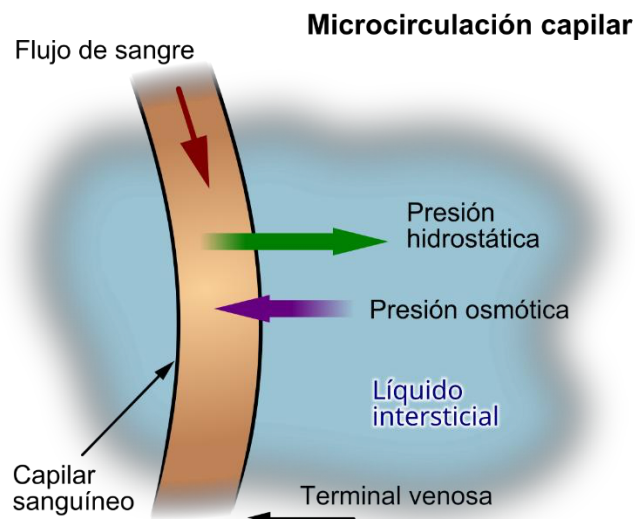
## Ecuación de Starling: Balance de fuerzas

La ecuación de Starling permite calcular el flujo neto de líquido:

$$\text{Flujo neto} = (PH_c - PH_i) - (\pi_c - \pi_i)$$

- Si el flujo neto es positivo, predomina la filtración (movimiento de líquido hacia el intersticio) (Brandys, 2022).
- Si es negativo, predomina la reabsorción (movimiento de líquido hacia el capilar) (Brandys, 2022).

La Figura 38 ilustra de manera esquemática el equilibrio capilar según las presiones descritas por Starling, mostrando cómo la interacción entre la presión hidrostática y la presión osmótica determina el movimiento de fluidos a través de la pared capilar. Esta representación visual facilita la comprensión del proceso dinámico de filtración y reabsorción que ocurre en la microcirculación, constituyendo un principio fundamental para explicar fenómenos como la formación de edema, la regulación del volumen intersticial y el mantenimiento del equilibrio hídrico entre el compartimento vascular y el intersticial.



**Figura 38.** Representación esquemática del equilibrio capilar según las presiones de Starling

**Fuente:** Arcadian (2006)

La Tabla 34 resume las principales presiones de Starling, detallando su ubicación y el efecto fisiológico que ejercen sobre el movimiento de líquidos capilares. Esta síntesis permite visualizar de forma clara cómo cada presión, hidrostática u oncótica, tanto en el capilar como en el intersticio, contribuye a favorecer la filtración o la reabsorción. El análisis conjunto de estas presiones resulta esencial para comprender alteraciones clínicas asociadas a desequilibrios en la microcirculación, como edemas, hemoconcentración o pérdidas de volumen plasmático.

**Tabla 34.** Resumen de las Presiones de Starling

| Presión               | Ubicación          | Efecto principal                 |
|-----------------------|--------------------|----------------------------------|
| <b>PH<sub>c</sub></b> | Dentro del capilar | Favorece la filtración           |
| <b>PH<sub>i</sub></b> | En el intersticio  | Se opone a la filtración         |
| <b>π<sub>c</sub></b>  | Dentro del capilar | Favorece la reabsorción          |
| <b>π<sub>i</sub></b>  | En el intersticio  | Favorece levemente la filtración |

**Fuente:** Adaptado de Brandys (2022)

## **Dinámica del Líquido Capilar**

La dinámica de líquidos en los capilares depende de un delicado balance entre las fuerzas de presión hidrostática y presión oncótica, conocidas como las fuerzas de Starling. Este equilibrio determina si el líquido fluye hacia fuera del capilar (filtración) o hacia dentro (reabsorción).

Durante el trayecto del capilar, estas fuerzas cambian progresivamente:

- **En el extremo arterial del capilar:**

- La presión hidrostática capilar (PHc) es elevada, alrededor de 30-35 mmHg en promedio, superando la presión oncótica capilar ( $\pi_c$ ), que se mantiene cerca de 25 mmHg.
- Como resultado, existe un flujo neto de líquido desde el capilar hacia el espacio intersticial, favoreciendo la filtración (Acosta, 2015).

- **En el extremo venoso del capilar:**

- La PHc disminuye progresivamente hasta unos 10-15 mmHg, debido a la resistencia al flujo dentro de los capilares.
- En este punto, la presión oncótica ( $\pi_c$ ) se vuelve mayor que la presión hidrostática, favoreciendo la reabsorción del líquido desde el intersticio de vuelta al capilar (Acosta, 2015).

## **Balance General de Flujo de Líquido**

Aunque gran parte del líquido filtrado en el extremo arterial se reabsorbe en el extremo venoso, aproximadamente un 10-15% del volumen filtrado no retorna directamente al capilar. Este exceso de líquido intersticial es recogido por los capilares linfáticos, que constituyen una vía accesoria indispensable para evitar la acumulación de fluido en los tejidos y el desarrollo de edemas.

El flujo neto de líquido puede expresarse mediante la ecuación modificada de Starling:

$$\text{Flujo neto} = K_f \times [(PH_c - PH_i) - (\pi_c - \pi_i)]$$

donde:

- $K_f$  = Coeficiente de filtración capilar (permeabilidad del capilar)
- $PH_c$  = Presión hidrostática capilar
- $PH_i$  = Presión hidrostática intersticial
- $\pi_c$  = Presión oncótica capilar
- $\pi_i$  = Presión oncótica intersticial

### **Función Complementaria del Sistema Linfático**

El sistema linfático drena el líquido filtrado excedente junto con proteínas de gran tamaño que escapan de los capilares, devolviéndolos a la circulación venosa a través de los conductos linfáticos principales. Este sistema resulta esencial para mantener el volumen plasmático y prevenir el colapso circulatorio o la formación de edemas patológicos.

Por ejemplo, en condiciones como la hipoalbuminemia (baja concentración plasmática de proteínas), la presión oncótica disminuye, favoreciendo la filtración excesiva y la acumulación de líquido en los tejidos.

### **Aplicaciones Clínicas**

Alteraciones en las Presiones de Starling pueden dar lugar a diversas condiciones patológicas:

- **Edema:** Puede originarse por un aumento en la  $PH_c$  (como en la hipertensión venosa), una disminución en la  $\pi_c$  (por hipoalbuminemia) o por bloqueo del drenaje linfático (Patel, 2024).

- **Deshidratación severa:** Un incremento en la  $\pi_c$  puede favorecer una reabsorción excesiva, reduciendo el líquido intersticial y provocando deshidratación.
- **Inflamación:** Durante la inflamación, el aumento en la permeabilidad capilar y en la  $\pi_i$  favorece la salida de líquido al intersticio (Patel, 2024).

### **Aspectos Adicionales y Regulación Integral**

La función del sistema cardiovascular no se limita a la contracción rítmica del corazón y el flujo pasivo de sangre por los vasos. Su eficacia depende de una regulación fina y multifactorial que integra la modulación de la fuerza de contracción cardíaca, la adaptación del volumen de llenado y la resistencia que enfrenta el corazón durante la eyección. Estos procesos están influenciados por mecanismos neurohormonales, propiedades intrínsecas del miocardio y condiciones hemodinámicas periféricas (Maltos, 2019).

### **Contracción miocárdica y regulación hemodinámica**

#### **Inotropismo y control autonómico**

El inotropismo hace referencia a la capacidad del miocardio para modificar la fuerza de contracción independiente del volumen de llenado. Esta propiedad es regulada principalmente por el sistema nervioso autónomo y por sustancias inotrópicas (Reece, 2015):

- **Estímulo simpático:** A través de los receptores  $\beta_1$ -adrenérgicos, el sistema simpático libera catecolaminas (adrenalina y noradrenalina) que aumentan la entrada de calcio al citoplasma durante la sístole, intensificando la contracción ventricular (efecto inotrópico positivo) (Reece, 2015).

- **Estímulo parasimpático:** Mediado por la acetilcolina a través de los receptores muscarínicos, tiene un efecto inotrópico negativo, aunque su acción es más notable en las aurículas que en los ventrículos.

Este equilibrio permite que el corazón se adapte a diferentes exigencias fisiológicas, como el ejercicio, el estrés o el reposo.

### **Precarga (Preload) y Poscarga (Afterload)**

El rendimiento del corazón depende, además, de dos factores determinantes:

- **Precarga:** Es el grado de estiramiento del músculo cardíaco al final de la diástole, justo antes de la contracción. Cuanto mayor sea el llenado ventricular (mayor volumen telediastólico), más se estiran las fibras del miocardio, lo cual incrementa la fuerza de contracción. Este fenómeno se describe en la ley de Frank-Starling, que establece una relación directa entre el volumen de llenado y el volumen sistólico, dentro de límites fisiológicos (Bishop et al., 2000).
- **Poscarga:** Representa la resistencia que deben vencer los ventrículos para eyectar la sangre. Está determinada principalmente por la presión arterial en la circulación sistémica (para el ventrículo izquierdo) o pulmonar (para el ventrículo derecho), así como por la resistencia vascular periférica. Un aumento en la poscarga implica un mayor trabajo para el corazón y puede disminuir el volumen sistólico si no hay compensación inotrópica adecuada (Bishop et al., 2000).

La interacción entre precarga, poscarga e inotropismo define el volumen sistólico y, por ende, el gasto cardíaco. Estas variables son dinámicas y se ajustan continuamente según las necesidades metabólicas del organismo.

Aunque la mayor parte del líquido filtrado en el extremo arterial de los capilares se reabsorbe en el extremo venoso, siempre queda un excedente que no

retorna directamente a la circulación sanguínea. Aquí entra en juego el sistema linfático, cuya función resulta esencial para completar el retorno del líquido al compartimento vascular y prevenir la aparición de edemas.

## **Fisiología del Sistema Linfático**

### **Organización General y Componentes**

El sistema linfático es una red vascular complementaria al sistema cardiovascular que desempeña funciones críticas en el mantenimiento del equilibrio de líquidos, el transporte de lípidos absorbidos en el intestino y la respuesta inmunitaria (Reece, 2015). Está compuesto por linfa, vasos linfáticos, ganglios linfáticos y órganos linfoides especializados que cooperan para conservar la homeostasis interna y defender al organismo frente a agentes patógenos.

### **Linfa**

La linfa es el fluido que circula por los vasos linfáticos, formada a partir del líquido intersticial que no ha sido reabsorbido por los capilares sanguíneos. Su producción es continua y representa una vía accesoria para mantener el equilibrio de líquidos entre los compartimentos vasculares y tisulares. A diario, se generan entre 2 y 4 litros de linfa en un perro de tamaño mediano, aunque esta cifra puede variar según la especie, el estado fisiológico y el nivel de actividad física (Jason, 2023).

La linfa es un líquido transparente o ligeramente amarillento que contiene:

- Agua (90-95%)
- Proteínas plasmáticas (aunque en menor concentración que en el plasma)
- Linfocitos y macrófagos
- Electrolitos y productos metabólicos
- Lípidos en forma de quilomicrones (en linfa intestinal)

- Células tumorales o agentes patógenos (en condiciones patológicas)

La concentración de proteínas en la linfa oscila entre 1 y 4 g/dL, dependiendo del origen del drenaje (por ejemplo, la linfa hepática es más rica en proteínas que la linfa intestinal). Esta composición dinámica refleja tanto el estado fisiológico del tejido drenado como las necesidades metabólicas del organismo (Jason, 2023).

La linfa se forma cuando el exceso de líquido intersticial, que ha escapado del sistema capilar sanguíneo por filtración, penetra en los capilares linfáticos de extremo ciego. Este paso se produce gracias a un gradiente de presión entre el espacio intersticial (presión mayor) y el interior del capilar linfático (presión menor), facilitado por solapas endoteliales que funcionan como válvulas unidireccionales (Jason, 2023).

Una vez que el líquido entra en el capilar linfático, se convierte en linfa y avanza por vasos de mayor calibre hacia ganglios linfáticos, donde es filtrado antes de llegar al conducto torácico o al conducto linfático derecho, desembocando finalmente en la circulación venosa central, a nivel de la unión de las venas subclavias y yugulares (Jason, 2023).

## **Vasos Linfáticos**

Los vasos linfáticos constituyen una red de conductos que se inicia en los tejidos corporales, recolectando el exceso de linfa (Cáscales, 2019)

- **Estructura:**

Comienzan como capilares linfáticos, con paredes delgadas y permeables, que convergen en vasos de mayor calibre. Todos poseen válvulas unidireccionales que impiden el reflujo, asegurando el movimiento de la linfa hacia los grandes vasos venosos (Cáscales, 2019).

- **Funciones morfofuncionales:**

- **Drenaje:** Recolectan el líquido intersticial no reabsorbido por los capilares sanguíneos.

- **Absorción de lípidos:** Los vasos linfáticos especializados del intestino delgado, llamados *lacteales*, absorben grasas en forma de quilomicrones (Cáscales, 2019).
- **Vigilancia inmunológica:** Transportan antígenos y células inmunitarias hacia los ganglios linfáticos para su procesamiento (Cáscales, 2019).

La Tabla 35 presenta una comparación estructural y funcional entre los vasos linfáticos y los vasos sanguíneos, resaltando sus diferencias clave en cuanto a dirección del flujo, contenido, presencia de válvulas y presión interna. Esta síntesis permite comprender cómo cada sistema vascular se adapta a su función específica: mientras los vasos sanguíneos mantienen un circuito cerrado de alta presión para distribuir sangre, los vasos linfáticos operan a baja presión y dependen de válvulas unidireccionales para movilizar la linfa hacia los grandes conductos venosos. Analizar estas diferencias es fundamental para entender el papel complementario de ambos sistemas en el mantenimiento de la homeostasis corporal.

**Tabla 35.** Diferencias entre vasos linfáticos y vasos sanguíneos

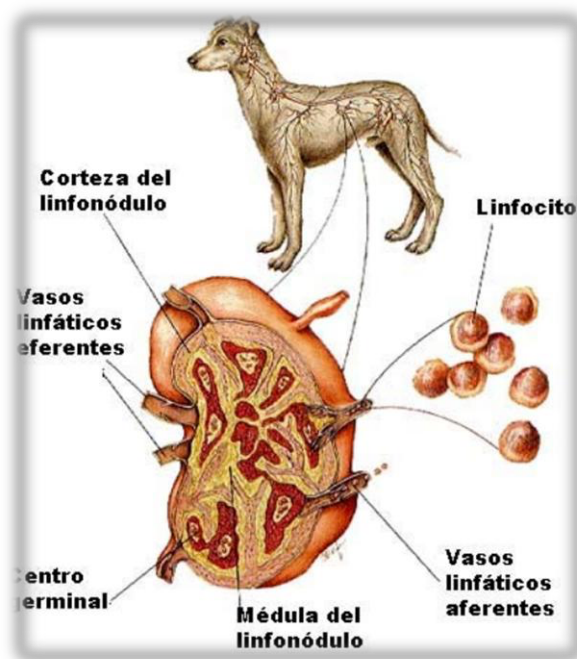
| Característica               | Vasos Sanguíneos                  | Vasos Linfáticos                       |
|------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------|
| <b>Dirección del flujo</b>   | Bidireccional (arterial y venosa) | Unidireccional (de tejidos a venas)    |
| <b>Contenido</b>             | Sangre (plasma, células)          | Linfa (líquido intersticial + células) |
| <b>Presencia de válvulas</b> | Solo en venas                     | Sí, en todos los vasos linfáticos      |
| <b>Presión interna</b>       | Alta (en arterias)                | Baja                                   |

**Fuente:** Adaptado de Hermann, (1983)

## Ganglios Linfáticos

Los ganglios linfáticos son órganos encapsulados, distribuidos en grupos en zonas estratégicas del cuerpo (cuello, axilas, ingles, mesenterio). Funcionan como filtros biológicos altamente especializados (Reece, 2015).

La Figura 39 muestra la organización morfofuncional de un ganglio linfático, destacando sus principales compartimentos y su relación con los vasos linfáticos aferentes y eferentes. Esta representación permite visualizar cómo la linfa ingresa al ganglio, es filtrada a través de una red de células inmunitarias altamente especializadas y finalmente retorna al sistema linfático. Comprender esta estructura es esencial para interpretar el papel de los ganglios como centros de vigilancia inmunológica, donde se detectan, procesan y responden a antígenos provenientes de los tejidos periféricos.



**Figura 39.** Organización morfofuncional de un ganglio linfático y su distribución en el cuerpo.

**Fuente:** Washington State University (2022)

- **Estructura:** Poseen una cápsula externa y una red interna de tejido linfoide organizado en regiones corticales y medulares. Están densamente poblados por linfocitos T, B y macrófagos (Reece, 2015).

- **Funciones morfofuncionales:**

**Filtración:** Retienen y eliminan microorganismos, células tumorales o desechos presentes en la linfa (Reece, 2015).

**Respuesta inmune adaptativa:** Activan linfocitos y favorecen la formación de memoria inmunológica (Reece, 2015).

## Órganos Linfoides

Los órganos linfoides se dividen en primarios (donde maduran las células inmunitarias) y secundarios (donde se activan en respuesta a antígenos).

- **Bazo:** Filtra la sangre, destruye eritrocitos envejecidos, almacena plaquetas y linfocitos, y responde ante infecciones sistémicas (Brejov, 2014).
- **Timo:** Órgano primario de maduración de linfocitos T. Es funcional principalmente en la infancia y experimenta involución con la edad (Brejov, 2014).
- **MALT (Tejido Linfático Asociado a Mucosas):** Incluye las placas de Peyer, las amígdalas y el tejido linfoide de vías respiratorias. Detecta antígenos en superficies mucosas y activa respuestas inmunes locales (Brejov, 2014).

## Funciones Integradas del Sistema Linfático

Si bien cada componente del sistema linfático tiene funciones específicas, su acción coordinada permite el cumplimiento de tres funciones fisiológicas esenciales:

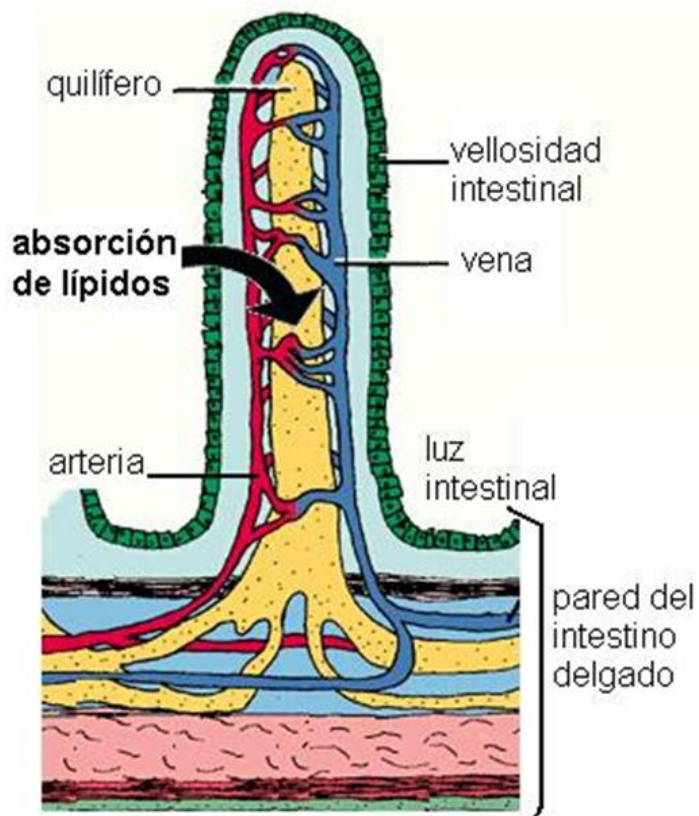
1. **Mantenimiento del equilibrio de líquidos corporales:** A través del drenaje de linfa hacia el sistema venoso, el sistema linfático evita la acumulación de

líquido intersticial y la formación de edemas. Esto asegura una adecuada presión oncótica y volumen circulante (Acosta, 2015).

**2. Defensa inmunológica y vigilancia:** La linfa transporta células inmunes, antígenos y señales de peligro hacia los ganglios y órganos linfoides, donde se filtra, se reconoce al agente extraño, y se inicia una respuesta inmune. Este sistema actúa como una red centinela en todo el organismo (Acosta, 2015).

**3. Absorción y transporte de lípidos:** En el intestino delgado, especialmente en el yeyuno, los lacteales o quilíferos recogen lípidos absorbidos en forma de quilomicrones y los integran en la circulación general mediante la linfa (Acosta, 2015).

La Figura 40 ilustra la organización estructural de una vellosidad intestinal, destacando la presencia del quilífero o lacteal central, elemento clave en la absorción de lípidos. Esta representación evidencia cómo los vasos sanguíneos y linfáticos se integran dentro de la vellosidad para permitir el transporte eficiente de nutrientes, mientras que la proximidad al epitelio intestinal favorece la captación selectiva de grasas, carbohidratos y otros compuestos esenciales. Comprender esta microarquitectura es fundamental para interpretar los mecanismos de digestión y absorción característicos del intestino delgado.



**Figura 40.** Estructura de una vellosidad intestinal con quilífero o lacteal central.

**Fuente:** Científico Técnico (2025)

Las funciones del sistema linfático y cardiovascular no se ejercen de manera aislada, sino que se integran con otros sistemas orgánicos. Esta integración permite respuestas fisiológicas coordinadas frente a cambios en la demanda metabólica, al estrés o a procesos patológicos.

### **Interacciones del Sistema Cardiovascular y Linfático con Otros Sistemas**

El sistema cardiovascular y el sistema linfático forman una unidad funcional vital para el mantenimiento de la homeostasis, ya que garantizan la distribución de oxígeno y nutrientes, el equilibrio de líquidos y la vigilancia inmunológica. Su fisiología se encuentra íntimamente relacionada con otros sistemas orgánicos, permitiendo al organismo responder de manera adaptativa a las exigencias internas y externas (Reece, 2015). A continuación, se describen las principales interacciones

con los sistemas respiratorio, renal, endocrino, digestivo, nervioso y musculoesquelético.

### **Relación con el Sistema Respiratorio**

La colaboración entre el sistema cardiovascular y el sistema respiratorio es esencial para asegurar una oxigenación adecuada de los tejidos, así como para mantener el equilibrio ácido-base del organismo.

- **Intercambio Gaseoso Pulmonar:** La circulación pulmonar lleva sangre desoxigenada desde el ventrículo derecho hasta los capilares de los alvéolos, donde ocurre el intercambio de oxígeno y dióxido de carbono. Cualquier alteración en la ventilación alveolar –como en el caso de neumonías, atelectasias o enfermedades obstructivas– repercute directamente sobre la oxigenación sanguínea y, en consecuencia, sobre la entrega de oxígeno a los tejidos (Dominelli & Sheel, 2024).
- **Relación Ventilación/Perfusión (V/Q):** La eficiencia del intercambio gaseoso depende de una adecuada relación entre la ventilación alveolar y la perfusión sanguínea. Un desbalance en esta relación puede dar lugar a hipoxemia (bajo oxígeno en sangre) o hipercapnia (acumulación de CO<sub>2</sub>), situaciones que desencadenan respuestas compensatorias cardiovasculares, como aumento de la frecuencia cardíaca o vasoconstricción pulmonar (Dominelli & Sheel, 2024).
- **Regulación del pH Sanguíneo:** El dióxido de carbono generado por el metabolismo celular se transporta en la sangre hasta los pulmones, donde se elimina. De esta manera, el sistema respiratorio y el cardiovascular trabajan de forma conjunta para regular el equilibrio ácido-base, modulando el contenido de bicarbonato y dióxido de carbono en el plasma (Dominelli & Sheel, 2024).

## Relación con el Sistema Renal

El sistema renal mantiene una estrecha interdependencia con el cardiovascular y el linfático, siendo crucial para el control del volumen sanguíneo, la presión arterial y la homeostasis de líquidos y electrolitos.

- **Perfusión Renal:** La presión arterial sistémica, determinada por el gasto cardíaco y la resistencia vascular periférica, regula directamente el flujo sanguíneo renal y, por ende, la tasa de filtración glomerular. Una disminución del flujo renal activa mecanismos compensatorios para restablecer el volumen y la presión sanguínea.
- **Sistema Renina-Angiotensina-Aldosterona (RAA):** Cuando el flujo renal disminuye, el aparato yuxtaglomerular libera renina, lo que desencadena una cascada que culmina en vasoconstricción y retención renal de sodio y agua, ayudando a restaurar la presión arterial (Fernández, 2000).
- **Péptidos Natriuréticos:** Secretados por el corazón ante el estiramiento de sus paredes, estos péptidos favorecen la natriuresis y la diuresis, oponiéndose a los efectos del RAA y reduciendo la sobrecarga de volumen.
- **Drenaje Linfático Renal:** El sistema linfático renal recoge el exceso de fluido intersticial, protegiendo a las nefronas de la compresión y asegurando una filtración glomerular eficiente (Fernández, 2000).

## Relación con el Sistema Endocrino

La actividad cardiovascular es modulada por diversas hormonas de origen cardíaco, renal, suprarrenal y cerebral, que ajustan la hemodinámica a las condiciones internas y externas.

- **Catecolaminas (Adrenalina y Noradrenalina):** Liberadas por la médula suprarrenal y las terminaciones simpáticas, incrementan la frecuencia cardíaca, la contractilidad y provocan vasoconstricción periférica (Arias, 2012).

- **Hormonas Antidiuréticas:** La aldosterona y la hormona antidiurética (ADH) regulan el volumen plasmático mediante la retención de sodio y agua, afectando así la precarga y la presión arterial.
- **Péptidos Natriuréticos (ANP y BNP):** Producidos por las aurículas y los ventrículos, estos péptidos inducen la eliminación de sodio y agua, ayudando a reducir la sobrecarga de volumen circulante.
- **Hormonas Tiroideas y Cortisol:** Modulan el metabolismo basal y la sensibilidad de los vasos sanguíneos a las catecolaminas, influyendo indirectamente sobre el gasto cardíaco y la presión arterial (Arias, 2012).

## Relación con el Sistema Digestivo

La relación entre el sistema cardiovascular, el linfático y el digestivo resulta indispensable tanto para la absorción de nutrientes como para la vigilancia inmunológica del tracto gastrointestinal.

- **Vascularización Esplácnica:** El aparato digestivo recibe una considerable cantidad de flujo sanguíneo, el cual tras la absorción de nutrientes es dirigido al hígado a través del sistema porta, donde ocurre su procesamiento y detoxificación (Torres, 2023).
- **Absorción de Lípidos:** A través de los lacteales intestinales, los lípidos absorbidos en forma de quilomicrones ingresan primero al sistema linfático, permitiendo su incorporación gradual a la circulación sistémica (Martínez, 1994).
- **Inmunidad Mucosa:** El tejido linfoide asociado a mucosas (MALT) constituye una primera línea de defensa frente a agentes patógenos ingeridos, demostrando una integración constante entre la función digestiva y la vigilancia inmunitaria (Arias, 2012).

## Relación con el Sistema Nervioso

La regulación de la función cardiovascular depende en gran medida del sistema nervioso autónomo y de mecanismos reflejos que responden de manera inmediata a cambios internos o ambientales.

- **Tono Simpático y Parasimpático:** El sistema simpático incrementa la frecuencia y la fuerza de contracción cardíaca, así como la resistencia vascular periférica, mientras que el parasimpático, a través del nervio vago, reduce la frecuencia cardíaca principalmente en reposo (González, 2019).
- **Mecanismos Reflejos:** Los barorreceptores y quimiorreceptores detectan cambios en la presión arterial o en los niveles de oxígeno y dióxido de carbono, generando ajustes rápidos que mantienen la estabilidad hemodinámica.
- **Regulación Neuroendocrina:** El eje hipotálamo-hipofisario modula la liberación de hormonas como la ADH, que participa en la regulación de la presión arterial y la volemia.

## Relación con el Sistema Musculoesquelético

La actividad muscular no solo tiene un impacto sobre el sistema locomotor, sino que también actúa como un modulador fundamental del retorno venoso y linfático.

- **Redistribución del Flujo Sanguíneo:** Durante el ejercicio, se produce una vasodilatación selectiva en los músculos activos, incrementando el suministro de oxígeno y nutrientes (Brejov, 2014).
- **Bomba Muscular:** La contracción rítmica de los músculos, al comprimir las venas profundas, facilita el retorno venoso y linfático, evitando el estancamiento circulatorio y reduciendo el riesgo de edemas.
- **Secreción de Mioquinas:** Durante la contracción muscular, se liberan mioquinas y factores de crecimiento endotelial que promueven la angiogénesis y mejoran la función endotelial.



## Resumen

El sistema cardiovascular y el sistema linfático trabajan en conjunto para asegurar el transporte eficiente de sustancias, la regulación de fluidos corporales y la defensa inmunitaria. El sistema cardiovascular está compuesto por el corazón, los vasos sanguíneos y la sangre; y tiene como función principal distribuir oxígeno, nutrientes, hormonas y eliminar productos de desecho. Su funcionamiento depende de la contracción coordinada del miocardio, regulada por impulsos eléctricos originados en el nódulo sinoauricular, y de la regulación precisa del gasto cardíaco, la presión arterial y la distribución sanguínea.

El corazón, estructurado en cuatro cavidades en mamíferos y aves, asegura una separación entre las circulaciones sistémica y pulmonar. El ciclo cardíaco alterna fases de sístole y diástole, controladas eléctricamente y evaluables mediante el electrocardiograma (ECG). La sangre, como fluido vital, transporta gases respiratorios, nutrientes y hormonas, y participa activamente en la regulación térmica, la coagulación y la inmunidad. Además, el endotelio vascular produce sustancias como el óxido nítrico y la prostaciclina, que modulan el tono vascular y la hemostasia.

El intercambio de sustancias entre capilares y tejidos se explica por la Ley de Fick y las presiones de Starling, que regulan la filtración y reabsorción de líquidos. Alteraciones en este equilibrio pueden desencadenar edemas, deshidratación o fallos en el retorno venoso. La función cardiovascular también se adapta a través de mecanismos que regulan la fuerza de contracción (inotropismo), el volumen de llenado (precarga) y la resistencia vascular (poscarga), asegurando un ajuste dinámico del gasto cardíaco.

Por su parte, el sistema linfático, compuesto por vasos linfáticos, ganglios linfáticos y órganos linfoides como el bazo, el timo y el tejido linfoide asociado a mucosas (MALT), participa en la recolección del líquido intersticial no reabsorbido, en la absorción de lípidos intestinales a través de los lacteales (quilíferos), y en la vigilancia inmunológica. Los ganglios linfáticos filtran la linfa y activan linfocitos, mientras que los órganos linfoides primarios y secundarios maduran y activan células inmunes.

Finalmente, ambos sistemas interactúan estrechamente con otros sistemas fisiológicos, como el respiratorio, renal, endocrino, digestivo y nervioso, conformando una red homeostática altamente integrada.

## Actividades

### 1. Conceptualización y Fundamentos Generales:

- a) ¿Cuáles son los componentes principales del sistema cardiovascular y del sistema linfático?

---

---

---

- b) Compara las funciones generales de ambos sistemas y su relevancia fisiológica para la homeostasis.

---

---

---

### 2. Anatomía Funcional y Fisiología Integrada:

- a) Describe las cavidades del corazón, las válvulas, y el recorrido de la sangre en ambas circulaciones.

---

---

---

- b) Clasifica los vasos sanguíneos según su estructura y función, e indica las diferencias clave con los vasos linfáticos.

---

---

---

- c) Explica cómo se produce la contracción cardíaca (inotropismo) y cómo se regulan la precarga y la poscarga.

---

---

---

---

### **3. Regulación y Mecanismos de Control:**

- a) Explica el papel del sistema nervioso autónomo y las hormonas (RAA, ADH, péptidos natriuréticos) en la regulación cardiovascular.

---

---

---

- b) ¿Cómo influyen el óxido nítrico, la prostaciclina y la endotelina-1 en el tono vascular?

---

---

---

### **4. Intercambio Capilar y Presiones de Starling:**

- a) Describe las presiones de Starling y su papel en la filtración y reabsorción capilar.

---

---

---

- b) Analiza la función del sistema linfático como complemento de este proceso y su papel frente a edemas.

---

---

---

### **5. Fisiología Clínica:**

- a) ¿Qué alteraciones pueden ocurrir si falla el equilibrio entre las presiones de Starling?

---

---

---

---

- b) Analiza el impacto de la disfunción de los factores de coagulación en la hemostasia y propón una intervención veterinaria.

---

---

---

---

## **Taller**

### **1. Mapa Conceptual**

- Crea un mapa conceptual que relacione: anatomía cardíaca, ciclo cardíaco, regulación hormonal, presiones de Starling, factores de coagulación y el sistema linfático.

### **2. Práctica de Interpretación**

- Analiza un electrocardiograma (ECG) real o simulado. Identifica las ondas, intervalos y posibles alteraciones.
- Interpreta un esquema de vellosidad intestinal con quilífero y explica su función en la absorción de lípidos.

## Glosario

1. **Sistema Linfático:** Red auxiliar del sistema circulatorio que drena el exceso de líquido intersticial, absorbe lípidos intestinales y participa en la respuesta inmunitaria.
2. **Válvulas Cardíacas:** Estructuras que aseguran el flujo unidireccional de la sangre entre las cavidades cardíacas y los grandes vasos.
3. **Ciclo Cardíaco:** Secuencia de contracción (sístole) y relajación (diástole) que permite el llenado y vaciado de las cavidades del corazón.
4. **Inotropismo:** Capacidad del músculo cardíaco para modificar la fuerza de contracción independiente del volumen de llenado.
5. **Precarga:** Estiramiento de las fibras miocárdicas al final de la diástole, determinado por el volumen telediastólico.
6. **Poscarga:** Resistencia que debe vencer el ventrículo para eyectar sangre, relacionada con la presión arterial y la resistencia vascular periférica.
7. **Gasto Cardíaco (GC):** Volumen de sangre que el corazón expulsa por minuto. Se calcula como:  $GC = \text{Volumen Sistólico} \times \text{Frecuencia Cardíaca}$ .
8. **Presión Arterial (PA):** Fuerza ejercida por la sangre sobre las paredes de las arterias. Es un parámetro clave en la perfusión tisular.
9. **Electrocardiograma (ECG):** Registro gráfico de la actividad eléctrica del corazón, útil para diagnosticar arritmias y trastornos de conducción.
10. **Presión Hidrostática Capilar:** Fuerza que impulsa el líquido desde el capilar hacia el espacio intersticial (filtración).
11. **Presión Oncótica Capilar:** Fuerza osmótica generada por proteínas plasmáticas, que promueve la reabsorción del líquido hacia el capilar.
12. **Capilar Linfático (Lacteal o Quilífero):** Vasos linfáticos del intestino delgado especializados en la absorción de lípidos en forma de quilomicrones.

13. **Ganglio Linfático:** Estructura que filtra la linfa, aloja linfocitos y participa activamente en la activación de la respuesta inmune adaptativa.
14. **Óxido Nítrico (NO):** Vasodilatador producido por el endotelio que regula el flujo sanguíneo y reduce la presión arterial.
15. **Endotelina-1 (ET-1):** Vasoconstrictor potente producido por el endotelio en respuesta a hipoxia o estrés hemodinámico.
16. **Trombina:** Enzima que convierte el fibrinógeno en fibrina durante la coagulación sanguínea.
17. **Fibrina:** Proteína insoluble que forma la red estable del coágulo sanguíneo durante la hemostasia.
18. **Fibrinólisis:** Proceso de degradación de la fibrina que permite la disolución del coágulo y la restauración del flujo sanguíneo.
19. **Hemostasia:** Conjunto de mecanismos fisiológicos que detienen una hemorragia e involucran vasoconstricción, plaquetas y factores de coagulación.
20. **Edema:** Acumulación anormal de líquido en el espacio intersticial, producto de alteraciones en las presiones de Starling o en el drenaje linfático.

## Referencias Bibliográficas

- Abara, S., & Cepeda, J. (2022). Fisiología Respiratoria: El Control de la Respiración. *Revista Neumología Pediátrica*, 17(4), 117-121. [www.neumologia-pediatica.cl](http://www.neumologia-pediatica.cl)
- Acosta, K. (2015). Células sanguíneas, inmunidad y coagulación sanguínea. In *Fisiología conociendo lo descubierto*. Wordpress. <https://principiosfisiologia.wordpress.com>
- Adiveter. (2020). *Digestión de las grasas*. [https://www.engormix.com/avicultura/acidos-grasos-nutricion-aves/digestion-grasas\\_a46084/](https://www.engormix.com/avicultura/acidos-grasos-nutricion-aves/digestion-grasas_a46084/)
- Aguero, D. (2021). *Determinación del tiempo de apnea en estudiantes fumadores y no fumadores que cursan la carrera de Medicina* [Universidad Autónoma de Puebla]. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/items/a043faf9-a1b8-43c6-8eff-67587ac815ed>
- Aguilas, A. (2024). *Arteria, Capilar y Vena*. Pinterest. <https://es.pinterest.com/pin/arteria-capilar-y-vena--899594094299854499/>
- Alcázar, R., Albalade Ramón, M., & De Sequera Ortiz, P. (2025). Alteraciones del Metabolismo Ácido Base. In *Nefrología al día*. <https://www.nefrologiaaldia.org/es-articulo-alteraciones-del-metabolismo-acido-base-673>
- Allen. (2020). *Productos Excretores y su Eliminación*. Allen Career Institute. <https://allen.in/neet/biology/excretory-products-and-their-elimination>
- Alvarado, M. I. (2013). Fisiología de la Coagulación: Nuevos Conceptos Aplicados al Cuidado Perioperatorio. *Universitas Médica*, 54, 388-352. <https://www.redalyc.org/pdf/2310/231029996005.pdf>

- Andrade, A., & Bertrand, P. (2022). Fisiología respiratoria: Difusión de gases. *Neumol Pediatr*, 17. [https://www.researchgate.net/publication/359201239\\_FISIOLOGIA\\_RESPIRATORIA\\_DIFUSION\\_DE\\_GASES](https://www.researchgate.net/publication/359201239_FISIOLOGIA_RESPIRATORIA_DIFUSION_DE_GASES)
- Arcadian. (2006, September 27). *Microcirculación capilar*. Wikipedia. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Illu\\_capillary\\_microcirculation.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Illu_capillary_microcirculation.jpg)
- Arias, E. (2012). *Metabolismo*. <https://gredos.usal.es/handle/10366/119454?show=full>
- Aristizábal, R., Calvo, F., Valencia, L., Montoya, M., Barbosa, O., & Hincapié, V. (2015). Equilibrio Ácido-Base: El Mejor Enfoque Clínico. *Revista Colombiana de Anestesiología*, 43(3), 219-224. <https://doi.org/10.1016/j.rca.2015.04.001>
- Arranz, C. T., Elesgaray, R., & De los Ángeles Costa, M. (2018). El endotelio Vascular. In *Cardiología*. <https://www.saha.org.ar/documentos/publicaciones/libro/Cap.035.pdf>
- Arthurs, G. J., & Sudhakar, M. (2005). Carbon Dioxide Transport. *Continuing Education in Anaesthesia, Critical Care and Pain*, 5(6), 207-210. <https://doi.org/10.1093/bjaceaccp/mki050>
- Azucas, R. (2023). *Alvéolos*. <https://www.kenhub.com/es/library/anatomia-es/alveolos>
- Bartel, M. (2022). *Intestino delgado*. <https://www.msmanuals.com/es/hogar/trastornos-gastrointestinales/biolog%C3%ADa-del-aparato-digestivo/p%C3%A1ncreas>
- Bishop, C., Charles, B., Harvey, S., & Clark, L. (2000). *Avian Physiology*. <https://rlmc.edu.pk/themes/images/gallery/library/books/Physiology/Avian%20Physiology.pdf>

- Blázquez, C. (2012). *Sistema Venoso*. Universidad Veracruzana.  
<https://www.uv.mx/personal/cblazquez/files/2012/01/sistema-venoso.pdf>
- Boeta, M., Bálcazar, A., Cerbón, J. L., Hernández, J., Hernández, J., Páramo, R., Porras, A., Rangel, L., Salgado, B., Valencia, J., & Zarco, L. (2018). *Fisiología Reproductiva de los Animales Domésticos*.  
[https://www.fmvz.unam.mx/fmvz/publicaciones/archivos/Fisiologia\\_Reproductiva.pdf](https://www.fmvz.unam.mx/fmvz/publicaciones/archivos/Fisiologia_Reproductiva.pdf)
- Bofan, A.-B., Ionascu, J., & Sonea, A. (2015). Brachycephalic Airway Syndrome In Dogs. *Scientific Works. Series C. Veterinary Medicine*, 61, 103-112.  
[https://veterinarymedicinejournal.usamv.ro/pdf/2015/issue\\_1/Art18.pdf](https://veterinarymedicinejournal.usamv.ro/pdf/2015/issue_1/Art18.pdf)
- Brandys, K. (2022). Hipótesis De Starling. In *Fisiología de fluidos*.  
[https://espanol.libretexts.org/Salud/Anatom%C3%ADa\\_y\\_Fisiolog%C3%ADa/Libro%3A\\_Fisiolog%C3%ADa\\_de\\_Fluidos\\_\(Brandis\)/04%3A\\_Din%C3%A1mica\\_de\\_Fluidos\\_Capilares/4.02%3A\\_Hip%C3%B3tesis\\_de\\_Starling#:~:text=La%20hip%C3%B3tesis%20de%20Starling%20establece,onc%C3%B3tica%20a%20trav%C3%A9s%20del%20capilar.](https://espanol.libretexts.org/Salud/Anatom%C3%ADa_y_Fisiolog%C3%ADa/Libro%3A_Fisiolog%C3%ADa_de_Fluidos_(Brandis)/04%3A_Din%C3%A1mica_de_Fluidos_Capilares/4.02%3A_Hip%C3%B3tesis_de_Starling#:~:text=La%20hip%C3%B3tesis%20de%20Starling%20establece,onc%C3%B3tica%20a%20trav%C3%A9s%20del%20capilar.)
- Brejov, G. (2014). *semiologia\_guia\_completa*.  
[https://www.fvet.uba.ar/archivos/catedras/semiologia/semiologia\\_guia\\_completa.pdf](https://www.fvet.uba.ar/archivos/catedras/semiologia/semiologia_guia_completa.pdf)
- Calderón, F. J. (2025). *Fisiología de la Alta Montaña*. <https://oa.upm.es/87958/>
- Calvo, M. (2023). *Fisiología de la Absorción de Nutrientes por el Ap Digestivo*.  
<https://www.cvadi.es/wp-content/uploads/2023/10/FISIOLOGIA-DE-LA-ABSORCION-DE-NUTRIENTES-POR-EL-AP-DIGESTIVO-BP.pdf>
- Canet, J. (2006). *Fisiología Respiratoria*.  
<https://scartd.org/arxius/fisioresp06.pdf>
- Caramelo, C., Peña Deudero, J. J., Castilla, A., Justo, S., De Solis, A. J., Neria, F., Peñate, S., & Gonzales-Pacheco, F. R. (2006). Respuesta a la Hipoxia. *Medicina*, 66, 155-164.  
<https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/lil-440406>

- Carpenter, J. W., & Marion, C. J. (2023). *Exotic Animal Formulary*.  
<https://medivetpuebla.com/wp-content/uploads/2023/01/Exotic-Animal-Formulary-5th-Ed.pdf?srsId=AfmBOopcBqVewme4MzzNzs65pUGbf1KeJTBxRhsunstR1Fv4q8W2Keuk>
- Carracedo, J., & Ramírez, R. (2024). *Fisiología Renal* (V. L. Sellares, J. M. López Gómez, & A. L. De La Francisco, Eds.). <https://www.nefrologiaaldia.org/es-articulo-fisiologia-renal-335>
- Carranza, L. (2016). *Fisiología del Apetito y el Hambre* (Vol. 1, Issue 3).  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6194254>
- Carvalho, O., & Gonçalves, C. (2011). Comparative Physiology of the Respiratory System in the Animal Kingdom. In *The Open Biology Journal* (Vol. 4).  
<https://www.academia.edu/download/85251392/5108720f9a5197fc0b138367a69d8ae75705.pdf>
- Cascales, M. (2019). *Fisiología Del Aparato Digestivo*.  
<https://core.ac.uk/download/pdf/230316929.pdf>
- Castillo, A., & Del Pozo, P. (2018). Interacciones Cardiopulmonares: De La Fisiología a la Clínica. *Revista Chilena de Pediatría*, 89(ahead), 0-0.  
<https://doi.org/10.4067/s0370-41062018005000905>
- Charris, C. M. (2021). *Efectos de la Hipoxia en la Regeneración Tisular*.  
<https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/aea971ce-888d-4b47-84f4-88e4c647d9a0>
- Chen, S., Luo, S., & Yan, C. (2022). Gut microbiota implications for health and welfare in farm animals: A review. In *Animals* (Vol. 12, Issue 1). MDPI.  
<https://doi.org/10.3390/ani12010093>
- Científico Técnico. (2025). *Aparatos Circulatorio y Excretor*. Biología y Geología.  
<https://biogeo.es/1FPB/circulatoriolinfatico.htm>

- COIIB. (2015). *Sistema Respiratorio: Anatomía*.  
<https://www.infermeravirtual.com/files/media/file/97/Sistema%20respiratorio.pdf?1358605430>
- Colacilli, M., & Bazán, N. (2018). *Adaptaciones Respiratorias al Ejercicio*.  
<https://umnutrideporte.files.wordpress.com/2012/05/cap-046-adaptaciones-respiratorias.pdf>
- Cruz, A., García Álvarez, B., & Lozano, B. O. (2023). El Surfactante Pulmonar, un Sistema Lipoproteico Clave para la Mecánica Respiratoria. *Dossier Científico*, 17-21. <https://sebbm.es/revista/dossier/el-surfactante-pulmonar-un-sistema-lipoproteico-clave-para-la-mecanica-respiratoria/>
- Cunningham, J., & Klein, B. (2009). *Fisiología Veterinaria*.  
[http://190.181.56.11/sistemabibliotecario/doc\\_libros/591%202647%20Fisiolog%C3%ADa%20Veterinaria-Cunningham\(4ta%20Ed\)-20100906-104049.pdf](http://190.181.56.11/sistemabibliotecario/doc_libros/591%202647%20Fisiolog%C3%ADa%20Veterinaria-Cunningham(4ta%20Ed)-20100906-104049.pdf)
- Deban, S. M., & Carrier, D. R. (2002). Hypaxial Muscle Activity During Running and Breathing in Dogs. *Journal of Experimental Biology*, 205(13), 1953-1967. <https://doi.org/10.1242/jeb.205.13.1953>
- Designua, E. (2024). *Homeostasis Blood Pressure Regulation Vector Image*. VectorStock. <https://www.vectorstock.com/royalty-free-vector/homeostasis-blood-pressure-regulation-vector-53945336>
- Dezube, R. (2023). *Intercambio de Oxígeno y Dióxido de Carbono*.  
<https://www.msmanuals.com/es/hogar/trastornos-del-pulm%C3%B3n-y-las-v%C3%ADas-respiratorias/biolog%C3%ADa-de-los-pulmones-y-de-las-v%C3%ADas-respiratorias/intercambio-de-ox%C3%ADgeno-y-di%C3%B3xido-de-carbono?ruleredirectid=755>
- Dominelli, P. B., & Sheel, A. W. (2024). Fisiología de la Respiración en el Ejercicio. *Advances in Physiology Education*, 48(2), 238-251. <https://doi.org/10.1152/advan.00067.2023>
- Duren, S. (2021). *Digestive Health in Rabbits*.

- Escobar, A. (2005). El Binomio Pulmón-Cerebro. Sus Relaciones Fisiológicas y Fisiopatológicas. *Revista Del Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias*, 18, 38-42.  
[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-75852005000100007](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-75852005000100007)
- Eurell, J., & Frappier, B. (2006). *Textbook of Veterinary Histology*.  
<https://vetbooks.ir/dellmanns-textbook-of-veterinary-histology-6th-edition-with-cd/>
- Evangelista, D., Ferreira, J., Silveira, R. M. F., Morais, F. X., de Medeiros, C. C., Facó, O., de Sousa, J. E. R., & de Paula, V. V. (2022). Thermoregulatory responses, and acid-base and electrolytic balance of indigenous ewes of different coat colour in an equatorial semi-arid region. *Animal Production Science*, 62(2), 121-130. <https://doi.org/10.1071/AN20321>
- Fernández, P. (2000). Fisiología molecular del mecanismo de concentración urinario, papel de las aquaporinas renales. *Nefrología*, 6, 486-494.  
<https://www.revistanefrologia.com/es-fisiologia-molecular-del-mecanismo-concentracion-articulo-X0211699500035672>
- Fernando, P., Silvia, P., Luca, D. C., & Raffin, D. (2023). *CAPÍTULO 14 Sistema digestivo: cavidad oral y tubo digestivo*.
- Figueroa, D. (2004). *COMPARACIÓN DE LOS COMPONENTES ESTRUCTURALES DEL APARATO RESPIRATORIO DE AVES Y MAMÍFEROS, VOLADORES Y NO VOLADORES DANIELA PATRICIA FIGUEROA PÉREZ*.  
<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/134148/Comparaci%C3%B3n-de-los-componentes-estructurales-del-aparato-respiratorio-de-aves-y-mam%C3%ADferos%2C-voladores-y-no-voladores.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Figueroa, D. P. (2004). *Comparación de los Componentes Estructurales del Aparato Respiratorio de Aves y Mamíferos, Voladores y no Voladores*.  
<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/134148/Comparaci%C3%B3n-de-los-componentes-estructurales-del-aparato-respiratorio-de->

aves-y-mam%C3%ADferos%2C-voladores-y-no-  
voladores.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Franco, M., Navaf, L. G., Herrera-Acosta, J., & Bell, D. (1992). *Mecanismos de Regulación de la Filtración Glomerular: Sistema Retroalimentario Tubuloglomerular, Aspectos Fisiológicos y su Participación en la Fisiopatología de Enfermedades Renales.* 139-147.  
[https://www.anmm.org.mx/bgmm/1864\\_2007/1994-130-3-139-147.pdf](https://www.anmm.org.mx/bgmm/1864_2007/1994-130-3-139-147.pdf)

Franklin, S. H., Van Erck-Westergren, E., & Bayly, W. M. (2012). Respiratory Responses to Exercise in the Horse. *Equine Veterinary Journal*, 44(6), 726-732. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2012.00666.x>

Gallagher, A. (2020). *El sistema Digestivo en Animales.*  
<https://www.msdivetmanual.com/es/aparato-digestivo/introducción-al-aparato-digestivo/el-sistema-digestivo-en-animales>

Gambini, A., & Martin, R. (2010). *Sistema digestivo: Introducción.*  
<https://www.agro.uba.ar/users/biolab/Teoricos%202010/Clase%209%20Introducci%C3%B3n%20sistema%20digestivo.pdf>

García, F., García Río Alfredo Marqueríe, F., & España, M. (2004). Control de la Respiración. In *Arch Bronconeumol* (Vol. 40).

García, L., & López, G. (2007). *Evaluación de la Absorción y Metabolismo Intestinal.* 22.  
[https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0212-16112007000500002](https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0212-16112007000500002)

García, L., Rodríguez Reyes, O., & Rodríguez Carballosa, O. B. (2011). Regulación de la Respiración: Organización Morfofuncional de su Sistema de Control. *MEDISAN*, 15(4), 558.  
[https://www.academia.edu/98937413/Regulaci%C3%B3n\\_de\\_la\\_respiraci%C3%B3n\\_organizaci%C3%B3n\\_morfofuncional\\_de\\_su\\_sistema\\_de\\_control](https://www.academia.edu/98937413/Regulaci%C3%B3n_de_la_respiraci%C3%B3n_organizaci%C3%B3n_morfofuncional_de_su_sistema_de_control)

- García, T. M. (1979). Transporte de oxígeno. *Archivos de Bronconeumonología*, 15, 187-195. <https://www.archbronconeumol.org/en-estadisticas-S0300289615325321>
- Garza, G. (2008). *Fundamentos Electrofisiológicos del Electrocardiograma*. <https://fisiologia.facmed.unam.mx/wp-content/uploads/2019/10/Pr%C3%A1ctica-ECG-sesi%C3%B3n-III.pdf>
- Garza, R., Garza, S., & Perea, L. (2021). Gut Microbiota: a Fundamental Ally of the Human Organism. *Educacion Quimica*, 32(1), 10-19. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2021.1.75734>
- González, A., de la Peña, A., Rojas, M., López, N., Ustarroz, M., García, I., Bizarro, P., & Fortoul, T. (2020). Fisiología de la hemostasia y su Alteración por la Coagulopatía en COVID-19. *Revista de La Facultad de Medicina*, 63(5), 45-57. <https://doi.org/10.22201/fm.24484865e.2020.63.5.08>
- González, J. (2019). *Elaboración de un Manual Didáctico Para los Temas: Fisiología de la Digestión, Fisiología de Piel, Pelo y de la Producción de Lana y Fisiología de Producción de Huevo Y Muda en Aves; En Apoyo a la Asignatura Fisiología de los Procesos Productivos*. <https://ru.dgb.unam.mx/jspui/bitstream/20.500.14330/TES01000789451/3/0789451.pdf>
- González, Rocher, A., & Zapata, P. (2003). Quimiorreceptores Arteriales: Mecanismos Celulares y Moleculares de las Funciones Adaptativa y Homeostática del Cuerpo Carotídeo. *Rev Neurol*, 36, 239-254. <https://core.ac.uk/download/pdf/36100955.pdf>
- Gruartmoner, G., Mesquida, J., & Baigorri, F. (2014). Saturación tisular de oxígeno en el paciente crítico. In *Medicina Intensiva* (Vol. 38, Issue 4, pp. 240-248). Ediciones Doyma, S.L. <https://doi.org/10.1016/j.medin.2013.07.004>
- Guzmán, M., & Serrano, C. (2024). *Canales Iónicos y Gradientes*. <https://www.kenhub.com/es/library/fisiologia/canales-ionicos-y-gradientes>

- Hall, J., & Hall Michael. (2021). *Guyton and Hall textbook of medical physiology* (14th ed.) (14th ed.).  
<https://evolve.elsevier.com/cs/product/9780323758390?role=student>
- Hamja, A. (2025). *Emulsion de Grasas*. <https://es.vecteezy.com/artes-vectorial/35226264-emulsificacion-de-lipidos-ciencias-diseno-vector-ilustracion>
- Hermann Baum. (1983). *The Lymphatic System of the Dog*.
- Hidalgo, I., Mena, V., Fernández, B., Heredero, M., & Ruiz, W. (2005). Acidosis Metabólica: Un Reto para los Intensivistas. *Rev Cubana Pediatr*, 77.  
[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-75312005000200008](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-75312005000200008)
- Huguet, E., & Duberstein, K. (2023). *Cólico Equino*.  
<https://es.scribd.com/document/654080742/Colico-equino>
- Hurtado, C., Villegas, C., & Villegas, A. (2014). *Agua y Electrólitos, Equilibrio Hidroeléctrico*. <https://uniandes-2daguayequilibriumhidrico.blogspot.com/2014/>
- Interlab. (2024). *Factores de Coagulación: Pilares Claves en la Hemostasia*.  
[https://interlab.mx/articulosInteres/pdf/factores\\_de\\_coagulacion.pdf](https://interlab.mx/articulosInteres/pdf/factores_de_coagulacion.pdf)
- Jason, P. (2023). *El Aparato Digestivo del Ganado Vacuno de Carne*.  
<https://www.msdivetmanual.com/es/manejo-y>
- Jiao, F., Zhang, L., Limbu, S. M., Yin, H., Xie, Y., Yang, Z., Shang, Z., Kong, L., & Rong, H. (2023). A comparison of digestive strategies for fishes with different feeding habits: Digestive enzyme activities, intestinal morphology, and gut microbiota. *Ecology and Evolution*, 13(9).  
<https://doi.org/10.1002/ece3.10499>
- John E. Hall, & Michael E. Hall. (2020). *Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology*.  
[https://clinref.com/data/uploads/books/Guyton\\_and\\_Hall\\_Textbook\\_of\\_Medical\\_Physiology\\_14th\\_Ed.pdf](https://clinref.com/data/uploads/books/Guyton_and_Hall_Textbook_of_Medical_Physiology_14th_Ed.pdf)

- Johnson, N., Milinarsky Topaz, A., & Lezana Soya, V. (2022). Fisiología Respiratoria: Relación Ventilación / Perfusión. *Neumol Pediatr*, 17(4), 113–116. <https://revistaneumologiapediatrica.com/articulo/fisiolog%C3%ADa-respiratoria---relaci%C3%B3n-ventilaci%C3%B3n-perfusi%C3%B3n>
- Karasov, W. H., & Douglas, A. E. (2013). Comparative Digestive Physiology. *Comprehensive Physiology*, 3(2), 741–783. <https://doi.org/10.1002/cphy.c110054>
- Khan Academy. (2020). *La composition du sang*. Khan Academy. <https://fr.khanacademy.org/science/biologie-a-l-ecole/x5047ff3843d876a6:1er-degre-sciences-de-base/x5047ff3843d876a6:bio-1er-degre-les-systemes-circulatoire-et-pulmonaire/a/components-of-the-blood>
- Kunchur, M. G., Mauch, T. J., Parkanzky, M., & Rahilly, L. J. (2024). A review of renal tubular acidosis. *Journal of Veterinary Emergency and Critical Care*, 34(4), 325–355. <https://doi.org/10.1111/vec.13407>
- LadyofHats. (2018, May 31). *Cross section of an alveolus and capillaries showing diffusion of gases*. Wikipedia. [https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Cross\\_section\\_of\\_an\\_alveolus\\_and\\_capillaries\\_showing\\_diffusion\\_of\\_gases.svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Cross_section_of_an_alveolus_and_capillaries_showing_diffusion_of_gases.svg)
- Lal, M. K., Tiwari, R. K., Gahlaut, V., Mangal, V., Kumar, A., Singh, M. P., Paul, V., Kumar, S., Singh, B., & Zinta, G. (2022). Physiological and molecular insights on wheat responses to heat stress. In *Plant Cell Reports* (Vol. 41, Issue 3, pp. 501–518). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s00299-021-02784-4>
- Langston, C., & Chalhoub, S. (2023). Pathophysiology of Renal Disease. In *Small Animal Soft Tissue Surgery*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119693741.ch42>
- Libretti, S., & Puckett, Y. (2023). *Physiology, Homeostasis*. National Library of Medicine. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/books/NBK559138/>

- Lindenmeyer, C. (2022). *Vesícula Biliar y Vías Biliares*.  
<https://www.msdmanuals.com/es/hogar/trastornos-del-h>
- Loukas, M., Bellary, S. S., Kuklinski, M., Ferrauiola, J., Yadav, A., Shoja, M. M., Shaffer, K., & Tubbs, R. S. (2011). The Lymphatic System: A Historical Perspective. In *Clinical Anatomy* (Vol. 24, Issue 7, pp. 807-816).  
<https://doi.org/10.1002/ca.21194>
- Loutradis, C., Sarafidis, P., Marinaki, S., Berry, M., Borrow, R., Sharif, A., & Ferro, C. J. (2021). Role of hypertension in kidney transplant recipients. In *Journal of Human Hypertension* (Vol. 35, Issue 11, pp. 958-969). Springer Nature.  
<https://doi.org/10.1038/s41371-021-00540-5>
- Madelaire, C. B., Klink, A. C., Israelsen, W. J., & Hindle, A. G. (2022). Fibroblasts as an experimental model system for the study of comparative physiology. *Elsevier*. <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2022.110735>
- Madhero88. (2016, March 8). *Physiology of Nephron*. Wikimedia Commons.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Physiology\\_of\\_Nephron\\_es.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Physiology_of_Nephron_es.svg)
- Maina, J. N. (2014). Comparative Respiratory Physiology: The Fundamental Mechanisms and The Functional Designs of the Gas Exchangers. *Open Access Animal Physiology*, 53-66. <https://doi.org/10.2147/oaap.s53213>
- Maina, J. N., & Schachner, E. R. (2025). Biology of the avian respiratory system: development, evolutionary morphology, function and clinical considerations. In *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences* (Vol. 380, Issue 1920, p. 20230419).  
<https://doi.org/10.1098/rstb.2023.0419>
- Mainez, M. (2019). *Sistema Urinario*.  
<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.udocz.com%2Fapuntes%2F170865%2Fsistema-urinario&psig=AOvVaw1o9TaKLSqI0clHsR8fWMhf&ust=1745218188005000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBMQjhxqFwoTCKD8-f2C5owDFQAAAAAdAAAAABAE>

- Maltos, F. (2019). Regulación de la Función del Sistema Cardiovascular. *Observatory Teaching Learning of Physiology*.  
<https://zenodo.org/record/3553080/files/3.8%20Regulaci%C3%B3n%20de%20la%20funcion%20del%20sistema%20cardiovascular.pdf>
- Martinez, J. (1994). *Medicina Equina, Aparato Digestivo: Estudio Recapitulativo*.
- Martín, P. (1974). Curvas de Disociación de la Hemoglobina. *Archivos de Bronconeumología*, 10, 33-35. <https://www.archbronconeumol.org/es-curvas-disociacion-hemoglobina-articulo-X0300289674308535>
- Medellín, A. (2008). Funcionamiento e Importancia del Sistema Bicarbonato/CO<sub>2</sub> en la Regulación del pH Sanguíneo. *Ciencia Ergo Sum*, 15, 155-160. <https://www.redalyc.org/pdf/104/10415206.pdf>
- Medina, F. (2024). *Anatomía de la Nefrona*. UDocz.  
<https://www.udocz.com/apuntes/997480/anatomia-de-la-nefrona>
- Mendoza, B. (2016). *Sistema Respiratorio*. <https://slideplayer.es/slide/8168311/>
- Meses, P. (2019). *Introducción a la Fisiología: La Célula y la Fisiología General*.  
<https://paulinameses.video.blog/author/paumeses/>
- Montalvo, C. (2018). *Tejido Sanguíneo y Hematopoyesis*.  
<https://bct.facmed.unam.mx/wp-content/uploads/2018/08/Tejido-sanguineo.pdf>
- MSD Manuals. (2025). *Curva de Disociación de la Oxihemoglobina*.  
<https://www.msmanuals.com/es/professional/multimedia/image/curva-de-disociaci%C3%B3n-de-la-oxihemoglobina>
- Muriel, M. G., López, R. A., Frezza, M. S., & Hernández, H. O. (2022). *Enfermedades del Aparato Respiratorio de los Equinos* (pp. 140-233).  
[http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/136519/Documento\\_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/136519/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Niemiec, B., Gawor, J., Nemec, A., & Clarke, D. (2020). *Guías Dentales de la Asociación Mundial de Veterinarios de Pequeños Animales*.

<https://wsava.org/wp-content/uploads/2020/01/WSAVA-Dental-Guidelines-Spanish.pdf>

Nieto Barbero, M. A., Rodríguez Hermosa, J. L., Calle Rubio, M., Sánchez Alarcos, J. M. F., & Álvarez-Sala Walther, J. L. (2004). *Las Hormonas, El Sueño y Respiración*. 73-86. [https://www.neumomadrid.org/wp-content/uploads/monogvi\\_5.\\_las\\_hormonas.pdf](https://www.neumomadrid.org/wp-content/uploads/monogvi_5._las_hormonas.pdf)

Noren, S. R., & Williams, T. M. (2000). Body Size and Skeletal Muscle Myoglobin of Cetaceans: Sdaptations for Maximizing Dive Duration. In *Comparative Biochemistry and Physiology Part A* (Vol. 126). [https://www.academia.edu/115643834/Body\\_size\\_and\\_skeletal\\_muscle\\_myoglobin\\_of\\_cetaceans\\_adaptations\\_for\\_maximizing\\_dive\\_duration?ucsb-sw=42994694](https://www.academia.edu/115643834/Body_size_and_skeletal_muscle_myoglobin_of_cetaceans_adaptations_for_maximizing_dive_duration?ucsb-sw=42994694)

Noriega, M. (2011). *Motilidad del Tracto Intestinal*. <https://ocw.unican.es/mod/page/view.php?id=534&lang=en>

Nursing heart in ICU. (2021). *Complicaciones de la ventilación mecánica*. <https://nursingheartinicu.blogspot.com/>

ObesiMad. (2020). *Las hormonas del hambre y su relación con la cirugía bariátrica*. <https://obesimad.com/hormonas-del-hambre-y-cirugia-bariatrica/>

OpenStax. (2022). *Fisiología Cardíaca*. LibreTexts. [https://espanol.libretexts.org/Salud/Anatomia\\_y\\_Fisiologia/Libro%3A\\_Anatom%C3%ADa\\_y\\_Fisiolog%C3%ADa\\_1e\\_\(OpenStax\)/Unit\\_4%3A\\_Fluidos\\_y\\_Transporte/19%3A\\_El\\_Sistema\\_Cardiovascular\\_-\\_El\\_Coraz%C3%B3n/19.04%3A\\_Fisiolog%C3%ADa\\_Card%C3%ADaca](https://espanol.libretexts.org/Salud/Anatomia_y_Fisiologia/Libro%3A_Anatom%C3%ADa_y_Fisiolog%C3%ADa_1e_(OpenStax)/Unit_4%3A_Fluidos_y_Transporte/19%3A_El_Sistema_Cardiovascular_-_El_Coraz%C3%B3n/19.04%3A_Fisiolog%C3%ADa_Card%C3%ADaca)

Ortiz, J. (2020). *Transporte de gases durante el ejercicio*. Mundoentrenamiento. <https://mundoentrenamiento.com/transporte-de-gases-durante-el-ejercicio/>

Otero, A. (2020). *Tensión Superficial*. Pinterest. <https://ar.pinterest.com/pin/andrea-otero-aparato-respiratorio--722616702728526325/>

- Oviedo, G., & Garcés, C. (2017). *Fisiología del Ejercicio*.  
<https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/140667/1/Fisiolog%C3%ADa%20del%20ejercicio.pdf>
- Palomo, D. R., Alfaro Benavides, A., & Ghrelina, N. (2018). Actualización de la Fisiología Gástrica Palabras Clave. *Services on Demand Journal SciELO Analytics* Google Scholar, 5(5).  
[https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1409-00152010000200007](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1409-00152010000200007)
- Pardo, J. P., & Matuz, D. (2014). El Uso de la Ecuación de Henderson-Hasselbalch para el Cálculo del PH en Sangre. *REB*, 33, 48-50.  
[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1665-19952014000200003](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-19952014000200003)
- Patel, B. (2024). *Insuficiencia Respiratoria (Insuficiencia Pulmonar)*.  
<https://www.msdmanuals.com/es/hogar/trastornos-del-pulm%C3%B3n-y-las-v%C3%ADas-respiratorias/insuficiencia-respiratoria-y-s%C3%ADndrome-de-dificultad-respiratoria-aguda/insuficiencia-respiratoria?ruleredirectid=755>
- Pérez, H. (2013). *Fisiología Animal II*.  
<https://iestpelmilagro.edu.pe/biblioteca/items/show/21>
- Perez, H. (2013). *FISIOLOGÍA ANIMAL II "Por un Desarrollo Agrario Integral y Sostenible."*
- Pico, J. (2016). *Nutrición Animal*.  
<https://agricolasjulianpico11.blogspot.com/2016/08/glosario-nutricion.html>
- Piiper, J. (1982). Respiratory Gas Exchange at Lungs, Gills and Tissues: Mechanisms and Adjustments. *J. Exp. Biol*, 100, 5-22.  
<https://www.webpages.uidaho.edu/fish511/Readings/Readings%202010/Piiper%20comparative%20respiration.pdf>

- Pilla, R., & Suchodolski, J. S. (2021). The Gut Microbiome of Dogs and Cats, and the Influence of Diet. *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice*, 51(3), 605-621. <https://doi.org/10.1016/j.cvsm.2021.01.002>
- Planchet, J. A. (2019). La Tos en el Paciente Pediátrico. *VITAE*, 78. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7725998>
- Plazas, A. R., & Peñuela, M. L. (2012). *Una revisión a las Particularidades del Sistema Respiratorio Aviar*. <https://revistas.ucc.edu.co/index.php/sp/article/view/97>
- Quizlet. (2019). *Basic Arrhythmia*. Basic Arrhythmia. <https://quizlet.com/515040493/basic-arrhythmia-nurs-480-week-1-3-flash-cards/>
- Ramiro, E., Perez, J., Castellote, C., Franch, A., & Castell, M. (2008). *El Intestino: Pieza Clave del Sistema Inmunitario*. <https://scielo.isciii.es/pdf/diges/v100n1/punto1.pdf>
- Reece, W. O. (2015). *Dukes' Physiology of Domestic Animals*. [https://cuvas.edu.pk/cuvas\\_libraries/ebooks/Dukes'%20Physiology%20of%20Domestic%20Animals%20\(%20PDFDrive%20\)%20\(1\).pdf](https://cuvas.edu.pk/cuvas_libraries/ebooks/Dukes'%20Physiology%20of%20Domestic%20Animals%20(%20PDFDrive%20)%20(1).pdf)
- Riaño, I., & Suárez, T. (2006). Hipoglucemia. *Boletín de Pediatría*. 46, 69-75. [https://www.sccalp.org/documents/0000/0179/BolPediater2006\\_46\\_supl1\\_069-075.pdf](https://www.sccalp.org/documents/0000/0179/BolPediater2006_46_supl1_069-075.pdf)
- Rivera, G. (2022). *Pulmones*. <https://es.scribd.com/document/592482152/pulmones>
- Rodrigo López, J. L. (2006). Válvulas Cardíacas: Funcionamiento y Enfermedades. In *Libro de la salud cardiovascular* (pp. 457-464). Fundación BBVA. [https://www.fbbva.es/microsites/salud\\_cardio/mult/fbbva\\_libroCorazon\\_cap51.pdf](https://www.fbbva.es/microsites/salud_cardio/mult/fbbva_libroCorazon_cap51.pdf)
- Rodríguez, A. (2021). *La Conexión Hipotálamo -Neurohipófisis: Estructura, Funciones y Enfermedades Asociadas*.

<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/23517/MARTINEZ%20RODRIGUEZ%2C%20ANDREA.pdf?sequence=1>

Rodríguez, C., Waxman, S., & Lucas, J. (2017). *Particularidades Anatómicas, Fisiológicas y Etológicas con Repercusión Terapéutica, en Medicina Aviar (II): Aparato Digestivo, Aparato Cardiovascular, Sistema Músculo Esquelético, Tegumento y otras Características*.  
<https://botplusweb.farmaceuticos.com/documentos/2017/3/10/113722.pdf>

Romero, C. (2008). *La Importancia de la Cecotrofia en el Conejo*.  
[https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=La+importancia+de+la+cecotrofia+en+el+conejo&author=Romero+Mart%C3%ADn%2C+Carlos&publication\\_year=2008&journal=Bolet%C3%ADn+de+Cunicultura&volume=156&issue=&pages=53-56&issn=1696-6074&hl=es](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=La+importancia+de+la+cecotrofia+en+el+conejo&author=Romero+Mart%C3%ADn%2C+Carlos&publication_year=2008&journal=Bolet%C3%ADn+de+Cunicultura&volume=156&issue=&pages=53-56&issn=1696-6074&hl=es)

Rumiantes. (2023). *Anatomía del Aparato Digestivo de los Rumiantes*.  
<https://rumiantes.com/anatomia-del-aparato-digestivo-de-los-rumiantes/>

Saavedra, M., Escobar A, P., & Caussade L, S. (2022). Fisiología Respiratoria: Transporte de Gases en Sangre. *Revista Neumología Pediátrica*, 17, 72-75.  
[https://www.researchgate.net/publication/363813139\\_FISIOLOGIA\\_RESPIRATORIA\\_TRANSPORTE\\_DE\\_GASES\\_EN\\_SANGRE](https://www.researchgate.net/publication/363813139_FISIOLOGIA_RESPIRATORIA_TRANSPORTE_DE_GASES_EN_SANGRE)

Saleh, Z. (2024, December). *Organización del Centro Respiratorio*. Medizzy.  
<https://medizzy.com/feed/40877769>

Santeliz, H., Romano, L., González, A., & Hernández, H. (2008). El sistema Renina-Angiotensina-Aldosterona y su Papel Funcional Más Allá del Control de la Presión Arterial. *Revista Mexicana de Cardiología*, 19, 21-29.  
<https://www.medigraphic.com/pdfs/cardio/h-2008/h081d.pdf>

Sieck, G. C. (2018). Physiology in perspective: Homeostasis and survival. In *Physiology* (Vol. 33, Issue 2, pp. 84-85). American Physiological Society.  
<https://doi.org/10.1152/physiol.00006.2018>

- Sil, A. (2024). Oxygen Dissociation Curve: Reviewing the Physiology and Influencing Factors. *Asian Journal of Research in Infectious Diseases*, 15, 164-168. <https://doi.org/https://doi.org/10.9734/ajrid/2024/v15i12411>
- Silva, M., Mases, A., & Castillo, J. (2016). *Fisiología del Sistema Nervioso Autónomo*. Fundación Argentina de Anestesiología (FUNDANEST). <https://fundanest.org.ar/wp-content/uploads/2016/07/Fisiologia-Aplicada-a-la-Anestesiologia-Dr.-Fontanella.pdf>
- Sitja, N. (2010). *Epitelios Glandulares*. <https://es.scribd.com/document/40563796/Epitelios-Glandulares-Plan-Comun-1>
- Sjaastad, O., Sand, O., & Hove, K. (2016). *Physiology of domestic animals*. <https://vetbooks.ir/physiology-of-domestic-animals-3rd-edition/>
- Sordelli, D. (2020). *Interacción Huésped-Bacteria*. <https://fmed.uba.ar/sites/default/files/2020-07/1%20Micro%20%20Clase%20Huesped-Bacteria%20pdf.pdf>
- Soriano, C. (2021). *La Microbiota Intestinal en Perros*. <https://zagan.unizar.es/record/109226/files/TAZ-TFG-2021-4515.pdf?version=1>
- Suárez, M., González, A., Vila, M., González, A., & Santamarina, G. (2012). *Efusiones Pleurales en Pequeños Animales Pleural Effusions in Small Animals*. [https://ddd.uab.cat/pub/clivetpeqani/clivetpeqani\\_a2012v32n2/clivetpeqaniv32n2p65.pdf](https://ddd.uab.cat/pub/clivetpeqani/clivetpeqani_a2012v32n2/clivetpeqaniv32n2p65.pdf)
- Tardiolo, G., La Fauci, D., Riggio, V., Daghighi, M., Di Salvo, E., Zumbo, A., & Suter, A. M. (2025). Gut Microbiota of Ruminants and Monogastric Livestock: An Overview. In *Animals* (Vol. 15, Issue 5). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/ani15050758>
- Tattersall, G. J. (2007). Skin Breathing in Amphibians. In *Endothelial Biomedicine* (pp. 85-91). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511546198.010>

- Ticona Vidal, R. A., Maquera Quispe, L. F., Tuyo Aduviri, D. M., Huiza Cutipa, L. X., Barreda Palacios, P. P., Ramirez Alanoca, E. E., Mamani Barrueta, A. J., Velarde Quispe, R. E., & Velarde Quispe, A. A. (2021). Saliva: Control Nervioso, Composición y Función. *Revista Médica Basadrina*, 15(1), 67-74. <https://doi.org/10.33326/26176068.2021.1.1035>
- Tizard, I. (2009). *Inmunología Veterinaria*. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/826111/5592\\_Tema\\_9\\_Sub\\_1\\_Inmunologia\\_veterinaria.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/826111/5592_Tema_9_Sub_1_Inmunologia_veterinaria.pdf)
- Tonozi, C. (2021). *El sistema Respiratorio en Animales*. <https://www.msdivetmanual.com/es/aparato-respiratorio/introducci%C3%B3n-al-aparato-respiratorio/el-sistema-respiratorio-en-animales>
- Torres, A. (2023). *Diafragma*. <https://www.kenhub.com/es/library/anatomia-es/respiracion-pulmonar>
- Trimarchi, H. (2016). *El Podocito y la Membrana de Filtración Glomerular* (pp. 97-115). Hospital Británico de Buenos Aires. [https://www.nefrohospbritanico.org.ar/pdfs/4\\_El-podocito-y-la-membrana-de-filtracion-glomerular.pdf](https://www.nefrohospbritanico.org.ar/pdfs/4_El-podocito-y-la-membrana-de-filtracion-glomerular.pdf)
- University of Basrah. (2018). *Kidney in Canine, Feline, and Ovine*. <http://un.uobasrah.edu.iq/lectures/10381.pdf>
- Vera, O. (2018). Trastorno del Equilibrio Ácido-Base. *Rev Med La Paz*, 24(2), 65-76. [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1726-89582018000200011](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-89582018000200011)
- Villa, C. A. (2019). Anatomía e Histología Fisiológica del Riñón. *Observatory Teaching Learning of Physiology*. <https://zenodo.org/record/3564867/files/5.1%20Anatom%C3%ADa%20e%20Histolog%C3%ADa%20Renal%20%281%29.pdf>
- Villa Forte, A. (2022). *Sistemas Orgánicos*. <https://www.msdivetmanuals.com/es/hogar/fundamentos/el-cuerpo-humano/sistemas-org%C3%A1nicos>

Wapcaplet. (2006, June 2). *Diagrama del corazón humano*. Wikipedia.

Washington State University. (2022, January 4). *Anatomía del gato y el perro*.

Hospital

Veterinario

Docente.

<https://hospital.vetmed.wsu.edu/2022/01/04/cat-and-dog-anatomy/>

White, K. L. (2024). Physiology and Pathophysiology of Pain. In *Veterinary Anesthesia and Analgesia* (pp. 969-995). Wiley.

<https://doi.org/10.1002/9781119830306.ch46>

**Ronald Andreé Vitonera Rogel**

Médico Veterinario y Zootecnista (Universidad Técnica de Machala), con maestrías en Análisis Biológico y Diagnóstico de Laboratorio (UTPL) y en Medicina Veterinaria con especialización en Clínica y Cirugía de Pequeñas Especies (UCACUE). Actualmente, cursa un Doctorado en Biología en la Universidad Autónoma de Madrid, con especialización en Biología Funcional y Fisiología Animal.

Docente en la Universidad Técnica de Machala, donde imparte Anatomía Animal I, Fisiología Animal I y II, y Clínica de Especies Mayores. Su investigación se centra en fisiología animal, epidemiología y resistencia antimicrobiana, con múltiples publicaciones científicas.

**Robinson J. Herrera Feijoo**

Ingeniero Ambiental (Universidad Estatal Amazónica, Ecuador), con un Máster en Tecnologías de la Información Geográfica: SIG y Teledetección (Universidad de Extremadura, España). Doctorando en Biología en la Universidad Autónoma de Madrid, enfocado en modelos de distribución espacial y gestión ambiental.

Docente en universidades ecuatorianas, ha dirigido tesis y participado en investigaciones sobre biodiversidad, silvopastoreo y modelización ecológica. Cuenta con publicaciones indexadas y es revisor en MDPI.

**Jhon Bryan Mina Ortiz**

Licenciado en Laboratorio Clínico (UNESUM), con maestrías en Análisis Biológico y Diagnóstico de Laboratorio (UTPL) y Biotecnología (UNEMI).

Doctorando en Ciencias de la Salud en la Universidad de Zulia.

Docente en la Universidad Estatal del Sur de Manabí, imparte Bioquímica, Bioquímica Clínica y Micología. Investigador en microbiología clínica y bioquímica con publicaciones en revistas indexadas.

ISBN: 978-9942-53-069-1



**Compás**  
capacitación e investigación