

Libros de **Cátedra**

# Biofísica para estudiantes de Ciencias Veterinarias

Fernanda Coll Cárdenas y Daniela Olivera (coordinadoras)

**n**  
naturales

FACULTAD DE  
CIENCIAS VETERINARIAS



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE LA PLATA

# **BIOFÍSICA PARA ESTUDIANTES DE CIENCIAS VETERINARIAS**

Fernanda Coll Cárdenas  
Daniela Olivera  
(coordinadoras)

Facultad de Ciencias Veterinarias



Dedicado a los estudiantes de Ciencias Veterinarias,  
quienes han sido y son protagonistas fundamentales para escribir este libro.

# Agradecimientos

A nuestras familias, quienes con su apoyo desinteresado nos permitieron que fuera posible alcanzar un nuevo sueño.

Al Sr. José Luján por su valiosa colaboración en algunas ilustraciones de este libro.

A la Facultad de Ciencias Veterinarias que nos brindó el lugar propicio para lograr nuestras metas.

A la Cátedra de Histología, Embriología, Biología celular y del desarrollo; al Museo de Anatomía Veterinaria “Dr. Víctor Manuel Arroyo” y al Hospital Escuela de la Facultad de Ciencias Veterinarias que nos facilitaron material para algunas figuras.

# Índice

**Capítulo 1** \_\_\_\_\_ **6**

Biofísica como ciencia biológica. Integración de los sistemas físicos en los organismos vivos.  
*Gladys Laporte, Mariana Fernández Blanco.*

**Capítulo 2** \_\_\_\_\_ **20**

Biofísica de los compartimentos animales.  
*Matías Sirini, Romina Becerra.*

**Capítulo 3** \_\_\_\_\_ **43**

Biofísica de la actividad neuronal animal.  
*Fernanda Coll Cárdenas, Francisco Pellegrino, Joaquín Bruzzo Lafratto.*

**Capítulo 4** \_\_\_\_\_ **64**

Biofísica del equilibrio ácido-base del organismo animal.  
*Daniela Olivera, Pablo de la Sota.*

**Capítulo 5** \_\_\_\_\_ **83**

Biofísica de los sentidos animales.  
*Mariana Fernández Blanco, Pablo de la Sota.*

**Capítulo 6** \_\_\_\_\_ **108**

Biofísica del aparato locomotor animal.  
*Francisco Pellegrino, Joaquín Bruzzo Lafratto.*

**Capítulo 7** \_\_\_\_\_ **137**

Biofísica del aparato respiratorio animal.  
*Daniela Olivera, Daniel Olaiz.*

**Capítulo 8** \_\_\_\_\_ **157**

Biofísica de la circulación sanguínea animal.

*Romina Becerra, Joaquín Bruzzo Lafratto, Francisco Pellegrino.*

**Capítulo 9** \_\_\_\_\_ **170**

Biofísica termodinámica animal.

*Daniela Olivera, Ana Julia Amasino, Julieta Pelosi, Roque Miranda.*

**Capítulo 10** \_\_\_\_\_ **199**

Biofísica de las principales radiaciones con aplicación en Medicina Veterinaria.

*Ana Julia Amasino, Fernanda Coll Cárdenas, Julieta Pelosi.*

**Los autores** \_\_\_\_\_ **227**

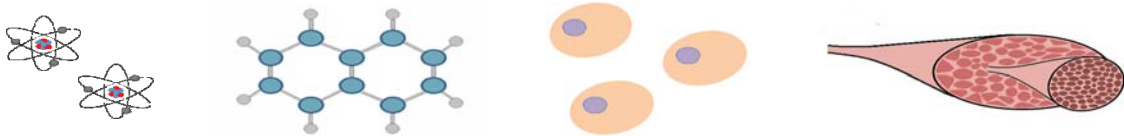
# CAPÍTULO 1

## Biofísica como ciencia biológica. Integración de los sistemas físicos en los organismos vivos

*Gladys Laporte, Mariana Fernández Blanco*

### Importancia de la biofísica en los organismos animales

La Biofísica pertenece al grupo de las Ciencias Básicas, por lo que constituye uno de los pilares de la Carrera de Medicina Veterinaria. Su estudio es de gran importancia ya que permite conocer los principios y fundamentos físicos de los fenómenos biológicos que tienen lugar en los organismos vivos, cada uno de los cuales constituye un sistema fisicoquímico complejo. En esta disciplina, se realiza un abordaje integral que incluye desde el estudio de los átomos y las moléculas, hasta las células, los tejidos y el organismo en su conjunto (Fig. 1.1), con el fin de aportar las bases necesarias para la comprensión de la fisiología animal, ya que los procesos que tienen lugar en el organismo vivo se rigen por las leyes generales de la Física.



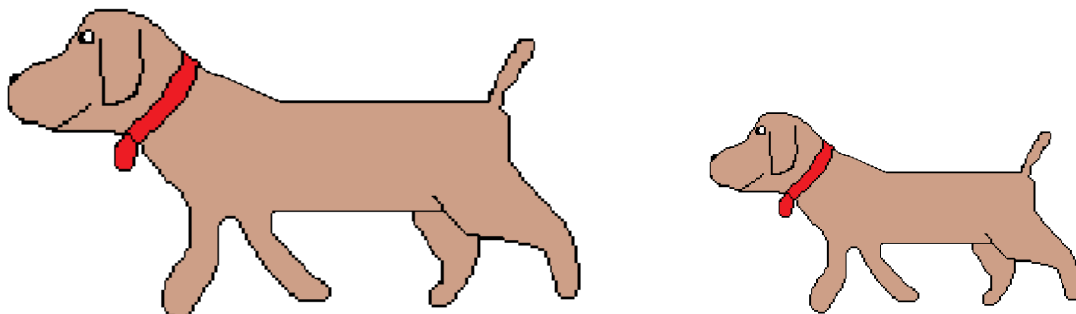
*Figura 1.1: Esquema que representa los átomos, las moléculas, las células y los tejidos.*

Por ejemplo, para comprender cómo se produce la formación de imágenes en el ojo, deberemos conocer las propiedades de la luz, las leyes de la reflexión y de la refracción, y el funcionamiento del ojo como sistema óptico. O para saber cómo se produce la audición, será importante conocer de qué manera y en qué medios se propagan las ondas sonoras para aplicar dichos conceptos al órgano del oído.

También la utilizamos en la práctica diaria, donde el médico veterinario debe realizar diferentes cálculos para hallar dosis de antiparasitarios, antibióticos u otros medicamentos que le administrará a su paciente según su peso (considerando también especie, raza, sexo y edad), intervalos de dosificación y duración del tratamiento correspondiente, así como también calcular el volumen de fluidos a administrar a un animal hospitalizado de acuerdo a su estado clínico. Además, algo que sucede con frecuencia, es que una misma droga puede estar formulada en distintas concentraciones, lo cual hay que considerar a la hora de medicar al animal. Por lo tanto, para realizar una correcta terapia, es fundamental el conocimiento de las diferentes unidades de medida y sus equivalencias. Otras unidades físicas que también tienen aplicación son las que sirven para medir la presión (presión intraocular, presión sanguínea, presiones parciales de gases en sangre), la densidad (densidad de la orina o de líquidos obtenidos de punciones), la temperatura, que son de utilidad a la hora de realizar una evaluación clínica. En el mismo sentido, la Biofísica nos ayudará a comprender el fundamento de diferentes técnicas y aparatos de medida, de uso complementario al diagnóstico, utilizados comúnmente en Medicina Veterinaria (rayos X, ultrasonografía, electrocardiografía, resonancia magnética nuclear, tomografía computarizada, etc.).

## **Comparación entre los diversos tamaños de estructuras biológicas y unidades de medida. Principales magnitudes físicas. Sistemas de unidades**

Los objetos y/o sistemas que existen en el universo pueden ser medidos; esta medición resulta ser un número seguido de una unidad a la que se la denomina magnitud. El número hace referencia a cuán grande o pequeña es la magnitud que medimos y nos permite relacionarlos. Por ejemplo, la masa de un animal de 15 kilos respecto de otro de 7 kilos, nos indica que uno es más pequeño que el otro (Fig. 1.2).



*Figura 1.2: Comparación de dos animales de diferente masa.*



Las magnitudes pueden clasificarse en dos grupos que se definen a continuación.

**Magnitudes escalares:** son aquellas cuyo valor numérico va acompañado por la unidad correspondiente. Por ejemplo: masa, tiempo, longitud, superficie, volumen y densidad.

Masa: es la cantidad de materia presente en un cuerpo. Se simboliza con la letra m. La escala de unidades de medida de masa es Tn (tonelada), Q (quintal), Mag (miriagramo), Kg (kilogramo), Hg (hectogramo), Dg (decagramo), g (gramo), dg (decigramo), cg (centigramo), mg (miligramo),  $\mu\text{g}$  (microgramo), ng (nanogramo), pg (picogramo). Así: 1 Tn = 1000 Kg; 1 Kg = 1000 g; 1 g = 1000 mg; 1 mg = 1000  $\mu\text{g}$ ; 1  $\mu\text{g}$  = 1000 ng; 1 ng = 1000 pg.

Tiempo: es el intervalo transcurrido entre dos hechos sucesivos. Así:

$$1 \text{ hora} = 60 \text{ minutos} \qquad 1 \text{ minuto} = 60 \text{ segundos}$$

Longitud: es la distancia entre dos puntos determinados. Se simboliza con la letra l. Sus unidades las veremos más adelante en este capítulo.

Superficie: medida de espacio bidimensional. Su unidad patrón es el metro cuadrado ( $\text{m}^2$ ).

Volumen: medida del espacio de tres dimensiones ocupado por un cuerpo. Su unidad patrón es el metro cúbico ( $\text{m}^3$ ).

Densidad: es la relación entre la masa y el volumen de un cuerpo. Se simboliza con la letra griega  $\delta$  (delta).

$$\delta = \frac{m}{V}$$

Donde: m = masa; V = volumen

**Magnitudes vectoriales:** son aquellas en las que el número no sólo va acompañado de la unidad correspondiente sino que además presenta una flecha o vector ( $\rightarrow$ ) que indica que esa magnitud tiene un punto de aplicación, dirección y sentido. Por ejemplo, como se observa en la Fig. 1.3, donde se aplica sobre una pelota (punto de aplicación), una fuerza a la que llamamos ( $\vec{F}$ ), en dirección horizontal y sentido hacia la derecha, intentando desplazarla de su posición original.

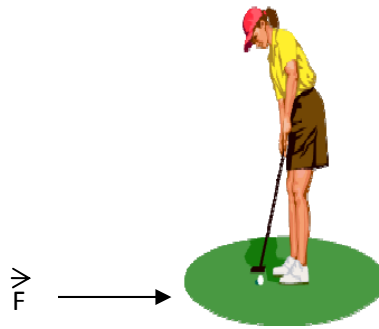


Figura 1.3: Magnitudes vectoriales.

Definimos Fuerza ( $\vec{F}$ ) como el empuje o arrastre que actúa sobre un cuerpo modificando su movimiento.

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

Donde: m = masa;  $\vec{a}$  = aceleración

Otros ejemplos de magnitudes vectoriales son peso, velocidad, aceleración, presión y peso específico, entre otras. Definimos a continuación, estas magnitudes.

Peso ( $\vec{P}$ ): es la fuerza con la que son atraídos los objetos por la acción de la gravedad.

$$P = m \cdot \vec{g}$$

Donde: m = masa;  $\vec{g}$  = aceleración de la gravedad

Velocidad ( $\vec{vel}$ ): es la relación entre la distancia o el espacio recorrido por un cuerpo en función del tiempo empleado.

$$\vec{vel} = \frac{e}{t}$$

Donde: e = espacio; t = tiempo

Aceleración ( $\vec{a}$ ): es el cambio de velocidad de un cuerpo que ocurre en un determinado tiempo.

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{vel}}{\Delta t}$$

Donde:  $\Delta \vec{vel}$  = variación o cambio de velocidad;  $\Delta t$  = variación de tiempo

Presión ( $\vec{Pr}$ ): es el cociente entre la fuerza ejercida por un cuerpo perpendicular a una superficie o área.

$$\vec{Pr} = \frac{\vec{F}}{S}$$

Donde:  $\vec{F}$  = fuerza; S = superficie o área.

Peso específico: es el cociente entre el peso de un cuerpo y el volumen que ocupa. Siendo el peso específico,  $\rho$  simbolizado por la letra griega rho.

$$\vec{\rho} = \frac{\vec{P}}{V}$$

Donde:  $\vec{P}$  = peso; V = volumen

Muchas veces en el área de las Ciencias Biológicas, se trabaja con cifras muy grandes o muy pequeñas, las que pueden ser expresadas en **notación científica** o potencias de base diez.

Por ejemplo, si queremos expresar que hay 1000000 de bacterias en un cultivo, podremos decir utilizando la notación científica que existen  $1 \cdot 10^6$ , porque 6 es la cantidad de veces que se corrió la coma hacia la izquierda hasta llegar a la primera cifra significativa distinta de cero (en este caso, el 1). Si el número fuera 0,000001, se podrá escribir en notación científica como  $1 \cdot 10^{-6}$ , habiendo desplazado la coma 6 lugares hacia la derecha, también hasta alcanzar la primera cifra significativa y como este valor es menor a la unidad, su exponente será negativo.

### Sistemas de Unidades

Existen varios sistemas de unidades. En nuestro caso, utilizaremos principalmente, el Sistema Métrico Decimal, el Sistema Cegesimal o también llamado C.G.S., el Sistema M.K.S. y el Sistema Internacional de Unidades (S.I).

En el **Sistema Métrico Decimal** el patrón de medida es el METRO (m), y se define como la longitud de la trayectoria recorrida por la luz en el vacío en un lapso de  $1 / 299792458$  fracciones de segundo (Jaime y col., 1998).

En este sistema, para medir **longitud** se utiliza el metro como unidad patrón, con múltiplos de 10 hacia la izquierda y submúltiplos hacia la derecha. Así, para expresar las unidades en m, podremos decir que 10 dm, 100 cm y 1000 mm son equivalentes a 1 m. En el caso de conversiones hacia unidades más grandes podremos expresar que 1 m es equivalente a 0,1 dam, 0,01 hm y 0,001 km.


$$\text{km}^2 \quad \text{hm}^2 \quad \text{dam}^2 \quad \text{m}^2 \quad \text{dm}^2 \quad \text{cm}^2 \quad \text{mm}^2 \quad \mu\text{m}^2 \quad \text{m}\mu^2 \quad (\text{o } \text{nm}^2) \quad \text{Å}^2$$

←→

En Medicina Veterinaria, para medir células, bacterias, virus, moléculas, etc. se utilizan unidades tales como los micrómetros, que se simbolizan con la letra griega mu ( $\mu$ ) (milésima


parte de un milímetro), los mili micrómetros (**mμ**) o nanómetros (**nm**) (milésima parte de un micrón) y el Angstrom (**Å**) (submúltiplo de 10 de la unidad anterior).

-Para medir **superficie**, es necesario elevar las medidas de longitud a 2 dimensiones:

$$\text{km}^2 \quad \text{hm}^2 \quad \text{dam}^2 \quad \text{m}^2 \quad \text{dm}^2 \quad \text{cm}^2 \quad \text{mm}^2 \quad \mu\text{m}^2 \quad \text{m}\mu^2 \quad (\text{o nm}^2) \quad \text{Å}^2$$


De la misma manera que relacionamos las unidades de longitud, podremos decir entonces que 1 m<sup>2</sup> es equivalente a 100 dm<sup>2</sup>, 10000 cm<sup>2</sup>, 1.10<sup>6</sup> mm<sup>2</sup>, 1.10<sup>12</sup> μm<sup>2</sup>, 1.10<sup>18</sup> mμ<sup>2</sup> y 1.10<sup>20</sup> Å<sup>2</sup>, expresados estos últimos valores en notación científica. Luego, en el caso de los múltiplos del m<sup>2</sup> podremos decir que 1 m<sup>2</sup> equivale a 1.10<sup>-2</sup> dam<sup>2</sup>, 1.10<sup>-4</sup> hm<sup>2</sup> y 1.10<sup>-6</sup> km<sup>2</sup>.

-De igual modo se procede para medir **volúmenes** elevando las unidades al cubo:

$$\text{km}^3 \quad \text{hm}^3 \quad \text{dam}^3 \quad \text{m}^3 \quad \text{dm}^3 \quad \text{cm}^3 \quad \text{mm}^3 \quad \mu\text{m}^3 \quad \text{m}\mu^3 \quad (\text{o nm}^3) \quad \text{Å}^3$$


Siguiendo con el razonamiento anterior, podremos expresar que 1 m<sup>3</sup> es equivalente a 1000 dm<sup>3</sup>, a 1000000 cm<sup>3</sup> o también 1.10<sup>6</sup> cm<sup>3</sup> (en notación científica), 1.10<sup>9</sup> mm<sup>3</sup>, 1.10<sup>18</sup> μ<sup>3</sup>, 1.10<sup>27</sup> mμ<sup>3</sup> y 1.10<sup>30</sup> Å<sup>3</sup>. Si nos desplazamos hacia la izquierda, podremos expresar que 1 m<sup>3</sup> es igual a 1.10<sup>-3</sup> dam<sup>3</sup>, 1.10<sup>-6</sup> hm<sup>3</sup> y 1.10<sup>-9</sup> km<sup>3</sup>. En la Tabla 1 se observan los prefijos de los diferentes Múltiplos y Submúltiplos del Sistema Métrico Decimal.

**Tabla 1: Prefijos de Múltiplos y Submúltiplos del Sistema Métrico Decimal.**

Potencia	Prefijo	Abreviatura	Potencia	Prefijo	Abreviatura
$10^1$	deca	da	$10^{-1}$	deci	d
$10^2$	hecto	h	$10^{-2}$	centi	c
$10^3$	kilo	k	$10^{-3}$	mili	m
$10^6$	mega	M	$10^{-6}$	micro	$\mu$
$10^9$	giga	G	$10^{-9}$	nano	n
$10^{12}$	tera	T	$10^{-12}$	pico	p
$10^{15}$	peta	P	$10^{-15}$	femto	f
$10^{18}$	exa	E	$10^{-18}$	atto	a
$10^{21}$	zetta	Z	$10^{-21}$	zepto	z
$10^{24}$	yotta	Y	$10^{-24}$	yocto	y

En la primera mitad del siglo XX surgen los otros sistemas, tales como el **M.K.S.** (metro, kilogramo, segundo) y el **C.G.S.** (centímetro, gramo, segundo), denominados así según cuáles fueran las unidades seleccionadas. En éstos, las **magnitudes básicas** son el tiempo, la masa, y la longitud.

El Sistema Cegesimal C.G.S, mide el tiempo en segundos, la masa en gramos y la longitud, distancia o espacio en cm, mientras que en el sistema M.K.S, el tiempo es medido en segundos, la masa en kg y la distancia en m.

Con el objeto de unificar y normalizar las unidades, la XI Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) adoptó en 1960, una extensión del Sistema Métrico Decimal con siete unidades fundamentales y otras derivadas de éstas, denominado **Système International d'Unités** (Sistema Internacional de Unidades) que se abrevia con la sigla **S.I.** en todos los idiomas (del Castillo, 2004). Estas unidades básicas se presentan en la Tabla 2, definiéndose, por ejemplo la unidad de tiempo, el SEGUNDO (s), como la duración de 9 192 631 770 periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado base del átomo de Cesio 133 (Fig. 1.4); la unidad de masa, KILOGRAMO (kg) como la masa igual a la del prototipo internacional del Kilogramo; la cantidad de sustancia, MOL (mol) como la cantidad de materia que contienen tantas unidades elementales como átomos existen en 0,012 Kilogramos de Carbono 12 ( $^{12}\text{C}$ ); la unidad de temperatura, KELVIN (K), como la fracción  $1/273,16$  de la temperatura termodinámica del punto triple del agua; la unidad de intensidad luminosa, candela (cd) se define como la intensidad luminosa, en una dirección

dada de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia  $540 \times 10^{12}$  Hz y cuya intensidad energética en esa dirección es de 1/683 watt por esterradián (Jaime y col., 1998) y al AMPERE (A) como la unidad básica de intensidad de corriente eléctrica (del Castillo, 2004).

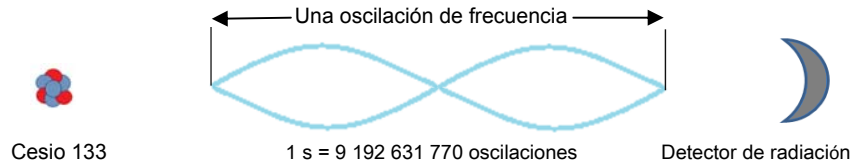


Figura 1.4: El segundo se define en base a la frecuencia de la radiación asociada a una transición atómica.

Tabla 2: Magnitudes Básicas del Sistema Internacional.

Magnitud	Nombre	Símbolo
Tiempo	segundo	s
Longitud	metro	m
Masa	kilogramo	kg
Cantidad de sustancia	mol	mol
Temperatura termodinámica	Kelvin	K
Intensidad luminosa	candela	cd
Corriente eléctrica	Ampere	A

Las **magnitudes derivadas** son aquellas que resultan de relacionar entre sí, multiplicando y dividiendo, las unidades básicas. Algunas de estas magnitudes están designadas por un nombre especial y un símbolo particular, por ejemplo Hertz (Hz), Newton (N), Pascal (Pa), Joule (J), Watt (W), Coulomb (C), Volt (V), Faradio (F), Ohm ( $\Omega$ ), Siemens (S), Becquerel (Bq), Gray (Gy), Sievert (Sv), etc.

En la Tabla 3 se expresa la relación entre los tres Sistemas de Unidades con sus magnitudes básicas y derivadas, la cual es necesaria para poder realizar las conversiones entre los distintos sistemas para un manejo práctico y sencillo.

**Tabla 3: Relación entre Sistemas de Unidades.**

MAGNITUD	FORMULA	CGS	MKS	S.I
LONGITUD		cm	m	m
MASA		gramos (g)	Kilogramos (kg)	Kilogramos (kg)
TIEMPO		segundos (s)	segundos (s)	segundos (s)
VELOCIDAD	vel= e/t	cm/s	m/s	m/s
ACELERACION	a= vel/t	cm/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>
FUERZA/PESO	F= m . a P= m . g	g. cm/s <sup>2</sup> = Dina	Kg. m/s <sup>2</sup> = Newton	Kg. m/s <sup>2</sup> = Newton
PESO ESPECIFICO	ρ= P/Vol	Dina/cm <sup>3</sup>	N/m <sup>3</sup>	N/m <sup>3</sup>
DENSIDAD	δ = m/Vol	g/cm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
TRABAJO	W=F. d	g.cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> = ergio	kg.m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> = Joule	Kg.m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> = Joule
CAUDAL	C= V/t =vel.S	cm <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s
PRESION	Pr=F/S	Dina/cm <sup>2</sup> = Barias	N/m <sup>2</sup> = Pascal	N/m <sup>2</sup> = Pascal
POTENCIA	Pot=W/t	ergio/s	Joule/s=Watt	Joule/s= Watt
ENERGIA CINETICA	Ec=1/2m.vel <sup>2</sup>	g.cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> = ergio	Kg.m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> = Joule	Kg.m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> = Joule
ENERGIA POTENCIAL	Ep=m . g. h	g.cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> = ergio	Kg.m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> = Joule	Kg.m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> = Joule

Entonces decimos que, para convertir unidades entre los sistemas, debemos considerar las siguientes equivalencias:

$$1 \text{ Newton} = 10^5 \text{ Dinias (Fuerza y Peso)}$$

$$1 \text{ Joule} = 10^7 \text{ ergios (Trabajo)}$$

$$10 \text{ Barias} = 1 \text{ Pascal} = 1013 \text{ hP (Presión)}$$

Existen unidades de Presión que no pertenecen a ningún Sistema de Unidades como es el caso de las atmósferas (atm), los Torricelli (torr), los milímetros de mercurio (mm Hg), los milibares (mb) y los bares. Así:

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ torr} = 760 \text{ mmHg} = 1013 \text{ mb} = 1,013 \text{ bar}$$

$$1 \text{ atm} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 1,013 \cdot 10^6 \text{ Barias}$$

Algunas de estas magnitudes ya fueron definidas anteriormente, nos restaría decir que:

Trabajo ( $\vec{W}$ ): es el producto de una fuerza aplicada sobre un cuerpo y del desplazamiento del cuerpo en dirección de esta fuerza.

$$\vec{W} = \vec{F} \cdot d$$

Donde:  $\vec{F}$  = fuerza; d = distancia

Caudal (C): es la cantidad de fluido que circula por unidad de tiempo en un determinado sistema o elemento.

$$C = \frac{V}{t}$$

Donde: V = volumen; t = tiempo

El caudal también se puede calcular a partir de la ecuación de continuidad, que se aplica a los fluidos que circulan por un tubo. De acuerdo con esta ecuación, el caudal es el producto de la velocidad del fluido por la sección que atraviesa.

$$C = \vec{vel} \cdot S$$

Donde:  $\vec{vel}$  = velocidad; S = sección

Potencia (Pot): es la relación entre el trabajo realizado y el tiempo empleado en efectuarlo.

$$Pot = \frac{\vec{W}}{t}$$

Donde:  $\vec{W}$  = trabajo; t = tiempo

Energía cinética (Ec): es la energía que tiene un cuerpo debida a su movimiento.

$$Ec = 1/2 m \cdot \vec{vel}^2$$

Donde: m = masa;  $\vec{vel}^2$  = velocidad al cuadrado

Energía potencial (Ep): es la energía que tiene un cuerpo debida a su posición.

$$Ep = m \cdot \vec{g} \cdot h$$

Donde: m = masa;  $\vec{g}$  = aceleración de la gravedad; h = altura



## Relación entre unidades de capacidad y volumen

La capacidad se define como la propiedad de contener cierta sustancia hasta un límite determinado. La unidad principal para medir capacidad es el litro, entonces podemos decir que el litro (L) es la capacidad de un cubo de un dm de arista. Los submúltiplos del litro más utilizados son los decilitros (dL), centilitros (cL), mililitros (mL) y microlitros ( $\mu$  L), mientras que en el caso de los múltiplos tenemos a los decalitros (daL), hectolitros (hL) y kilolitros (kL) que al igual que en las medidas de longitud van de 10 en 10. Así 1L serán 10 dL, 1000 mL y  $1 \cdot 10^6 \mu\text{L}$ .

kL   hL   daL   L   dL   cL   mL    $\mu\text{L}$

Las unidades de volumen, las vimos anteriormente. Ahora bien, para poder relacionar las unidades de capacidad y de volumen, debemos seguir el razonamiento representado en la figura siguiente (Fig. 1.5):

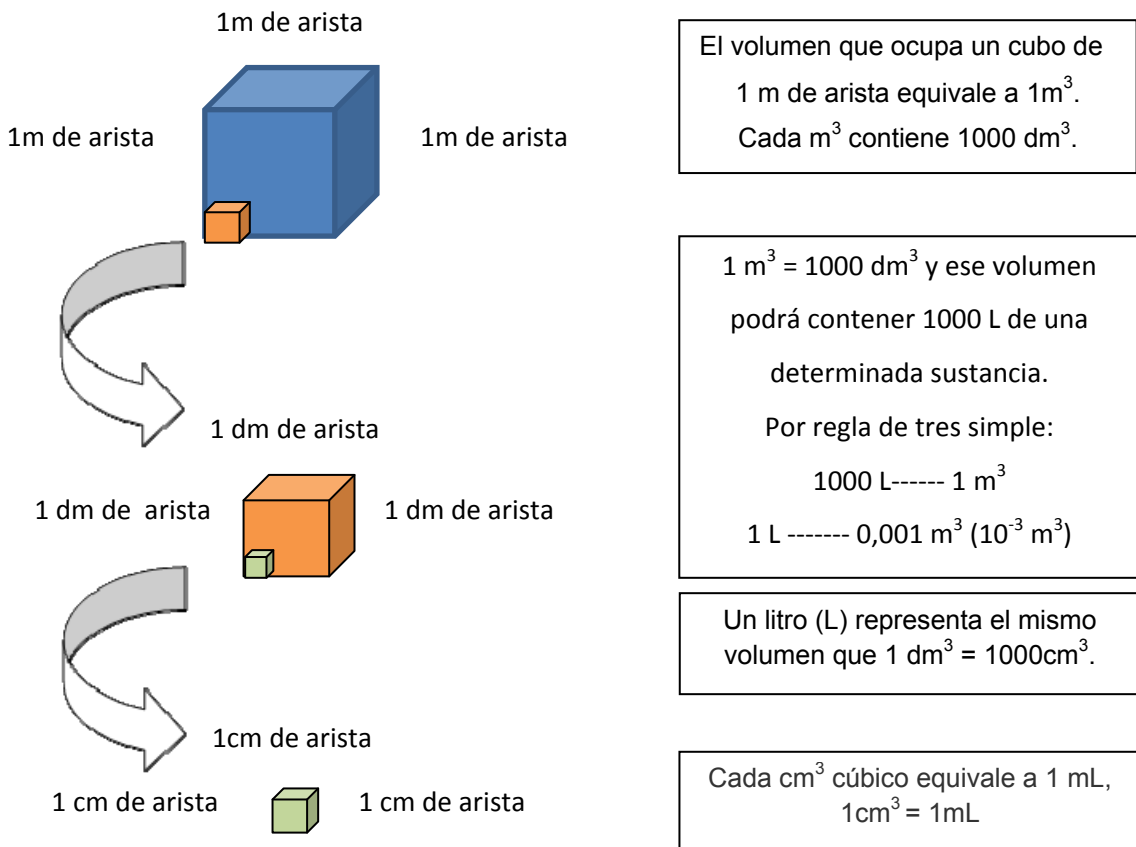


Figura 1.5: Relación entre unidades de capacidad y volumen.

## Relación entre unidades de Volumen, Capacidad y Masa

El Kilogramo se define como la masa de un volumen cúbico de agua de 10 cm de lado (10 cm x 10 cm x 10 cm) lo que equivaldría a 1000 cm<sup>3</sup>, siendo, por lo tanto, también equivalente a 1 L. Para poder comparar las unidades podemos decir que el volumen de la masa de un litro de agua, a 4°C equivale a 1 kg. Sin embargo, cabe aclarar que con ligeros cambios de temperatura, esta equivalencia no se cumple.

Entonces:

$$1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ L} = 1 \text{ Tn}$$

$$1 \text{ dm}^3 = 1 \text{ L} = 1 \text{ kg}$$

$$1 \text{ cm}^3 = 1 \text{ mL} = 1 \text{ g}$$

Para calcular la masa de otras sustancias distintas del agua, se debe conocer, además, la densidad específica de las mismas.

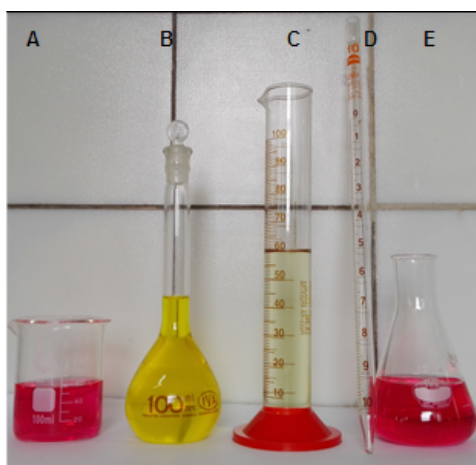
En Medicina Veterinaria es importante conocer y relacionar las unidades ya que serán utilizadas continuamente en la vida profesional. Muchos medicamentos están formulados en forma líquida, para lo cual se deben conocer las unidades de volumen. Asimismo, también se debe conocer la masa del animal para poder realizar una correcta dosificación. Por ejemplo, para controlar los parásitos existe una amplia gama de productos, entre los cuales el Antiparasitario Interno Oral es una formulación ideal para la primera desparasitación de los cachorros. Si la dosis para caninos es de 0,5 mL por kg de peso, para un cachorro de 2 kg de peso, ¿cuántos ml se deberán suministrar?

Se calcula la dosis realizando una regla de tres simple:

Si para 1 kg-----0,5 mL

2 kg ----- x = 2 kg . 0,5 mL / 1 kg = 1 mL

## Algunos materiales de vidrio utilizados comúnmente en el laboratorio



*Figura 1.6: Algunos materiales volumétricos de uso común: A: Vaso de precipitado; B: Matraz aforado; C: Probeta; D: Pipeta; E: Erlenmeyer.*

## Referencias

- Brown T. L.; Lemay H. E.; Bursten B. E.; Murphy C. J. (2009). Capítulo 1: Introducción: materia y medición. En T. L. Brown, H. E. Lemay, B. E. Bursten, C. J. Murphy. *Química, la ciencia central* (pp. 14-17). México: Pearson Educación.
- Cisale H. (2011). *Prólogo a la primera y segunda edición*. En H. Cisale (Ed). *Física biológica veterinaria (2ª edición)* (pp. 9-12). Buenos Aires: Eudeba.
- del Castillo J.H. (2004). El Sistema Internacional de unidades: aspectos prácticos para la escritura de textos en el ámbito de las ciencias de la salud. *Revista Panace@*. Vol. V, n° 17-18, 200-207.
- Jaimes H. N.; Pezet Sandoval F.; Mendoza Ilescas J.; Hernández Gutiérrez I. (1998). El Sistema Internacional de Unidades (SI). *El Tratado de la Convención del Metro y el Sistema Internacional de Unidades*. México: Publicación Técnica CNN-MMM-PT-003.
- Montoreano R. (2005). *Manual de fisiología y biofísica para estudiantes de medicina*. Recuperado de [http://www.fundabiomed.fcs.uc.edu.ve/inicio\\_montoreano.html](http://www.fundabiomed.fcs.uc.edu.ve/inicio_montoreano.html)
- Portal educativo conectando neuronas (2016). Recuperado de [www.portaleducativo.net](http://www.portaleducativo.net)
- Resnick R.; Halliday D.; Krane K. (2005). Volumen 1. Capítulo 1. Mediciones. En R. Resnick, D. Halliday, K. Krane (Eds.). *Física (5ª edición)* (pp. 1-11). México: Compañía Editorial Continental.
- Sistema Internacional de Unidades (2006) 8ª Edición □ 2ª edición en español (2008). Oficina Internacional de Pesas y Medidas. Organización Intergubernamental de la Convención del Metro.
- Wilson J. D.; Buffa A. J.; Lou B. (2007). Parte uno: mecánica. En J. D Wilson; A. J. Buffa; B. Lou. *Física (6ª edición)* (pp. 6-9). México: Pearson Educación.

# CAPÍTULO 2

## Biofísica de los compartimentos animales

*Matías Sirini, Romina Becerra*

### Soluciones

Comencemos por repasar algunos conceptos importantes. Definamos en principio qué son sistemas homogéneos y heterogéneos. Un **sistema homogéneo** puede considerarse a aquel formado por una sustancia pura o una solución, entendiendo por **solución** a un sistema homogéneo constituido por dos o más sustancias:

- Solvente o disolvente: es el componente mayoritario en una solución diluida.
- Soluto: es el componente que se encuentra en menor proporción.

Si pensamos en los líquidos corporales, el soluto en este caso son las sales (NaCl, NaHCO<sub>3</sub>, KCl, CaCl, etc.) y el solvente, el agua. Estas sales son solubles en agua y, sus moléculas en solución, se separan (disocian) para formar iones (estado iónico de la sal). Recordemos que los iones son átomos o moléculas con carga eléctrica (positiva o negativa) y que esta propiedad hace que las moléculas de agua rodeen a estos iones atraídas por esa carga (*capa de solvatación*). Esto sucede ya que el agua forma un dipolo con cargas positivas en el extremo de los hidrógenos, y negativas en relación al oxígeno (Fig. 2.1).

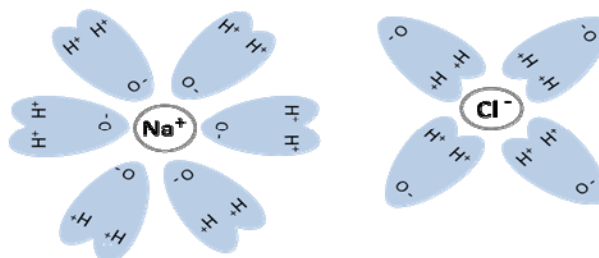


Figura 2.1: Esquema que muestra lo que sucede en una solución compuesta por H<sub>2</sub>O (agua) y Na<sup>+</sup>Cl<sup>-</sup> (cloruro de sodio).

La molécula de  $\text{Na}^+\text{Cl}^-$ , en solución con el agua, se disocia en sus iones constituyentes. En la figura 1 se representa la atracción entre el ion sodio ( $\text{Na}^+$ , positivo) y los extremos negativos de las moléculas de agua (oxígenos). Por otro lado, el ion cloruro ( $\text{Cl}^-$ , negativo) es atraído por los extremos positivos de la molécula del agua (hidrógenos).

Por otro lado, los sistemas heterogéneos son aquellos formados por dos o más fases. Entre ellos se incluyen a las mezclas o dispersiones groseras, las dispersiones coloidales y las soluciones verdaderas. También, dependiendo de la mezcla, en este grupo de sistemas podemos distinguir a las suspensiones y emulsiones:

- Mezclas o dispersiones groseras: aquellos sistemas que contienen partículas de un tamaño tal, que pueden ser observadas a simple vista o con la utilización de una lupa.
- Dispersiones coloidales: se caracterizan por un tamaño de partículas mayor al de las moléculas, pero no son lo suficientemente grandes como para observarse al microscopio óptico común.
- Soluciones verdaderas: son aquellas donde las partículas dispersas son muy pequeñas, menores a 1nm.
- Suspensiones: es una mezcla heterogénea formada por un sólido en polvo o por pequeñas partículas no solubles, que se dispersan en un medio líquido. Las partículas solo pueden ser observadas al microscopio óptico.
- Emulsiones: están formadas por pequeñas gotas de un líquido, dispersas en otro líquido. Es la mezcla de dos líquidos “no miscibles” (incapaces de formar una fase homogénea). El término “miscibilidad” se emplea para expresar la solubilidad de un líquido en otro.

Entonces, un sistema heterogéneo es un “sistema disperso”, es decir, formado por dos o más fases, una de las cuales es continua (fase dispersante), normalmente fluida, y otra discontinua (fase dispersa), en forma de partícula generalmente sólida. La superficie que separa ambas fases se llama **interfase**.

A estos sistemas dispersos los podemos clasificar según:

- **La velocidad con que las soluciones atraviesan una membrana semipermeable:**
  - **Cristaloides**: las que difunden fácilmente, por ejemplo, solución de cloruro de sodio ( $\text{Na}^+\text{Cl}^-$ ).
  - **Coloides**: las que difunden muy lentamente o no lo hacen, por ejemplo, solución proteica.

Fue el químico británico Thomas Graham, quien, estudiando la difusión de las sustancias disueltas, distinguió dos clases de solutos a los que denominó **crystaloides** y **coloides**. Llamó *crystaloides* a los compuestos que difunden rápidamente en el agua, atraviesan fácilmente las membranas permeables y semipermeables (membrana plasmática), y al ser evaporadas las soluciones de las que forman parte, quedan como residuos cristalinos. Por otro lado, denominó *coloides* a los compuestos que difunden lentamente o no lo hacen, a través de las membranas semipermeables y, al ser evaporadas las soluciones de las que forman parte, quedan como residuos gomosos (de ahí el nombre *coloide*, que proviene del griego *kolos* que significa *que puede pegarse*). Este nombre también hace referencia a la propiedad que tienen los coloides a tender a formar coágulos de forma espontánea.

- **Según el tamaño de las partículas que lo conforman:**

Tipos	Ejemplo	Diámetro de las partículas (nm)
Suspensiones groseras	Glóbulos rojos en sangre	> 100
Suspensiones coloidales	Proteínas en plasma	1 a 100
Soluciones verdaderas (crystaloides)	Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Cl <sup>-</sup> (iones) en plasma	< 1

Así, en la sangre, los glóbulos rojos forman una suspensión grosera y bastará dejar en reposo un tubo con sangre para ver que los glóbulos sedimentan, se van hacia el fondo, separándose la sangre en dos fases: PLASMA y GLÓBULOS. Si ahora, en ese plasma, se quiere separar las proteínas que están formando una suspensión coloidal, en el agua plasmática se verá que estas no sedimentan espontáneamente. Sin embargo, si se agrega un ácido al plasma, se formarán agregados proteicos y la suspensión pasará de coloidal a grosera, con lo que las proteínas precipitan. Por último, si se quiere separar el Na<sup>+</sup> o el Cl<sup>-</sup> del agua plasmática, se verá que éstos no sedimentan, no se forman dos fases y sólo por procedimientos más enérgicos, como la destilación, por ejemplo, se logra separar el agua y los iones. Esto se debe a que están formando una solución verdadera.

## Características del sistema o estado coloidal

- Es un sistema disperso
- El tamaño de sus partículas es de 1 a 100 nm
- No es posible observar un coloide al microscopio óptico. Se utiliza el ultramicroscopio (*microscopio de fondo oscuro*).
- Difunden lentamente o no lo hacen a través de membranas semipermeables (membranas plasmáticas).
- La fase dispersa (ej. proteína) está acompañada de una capa de líquido (fase dispersante), dando lugar a las “micelas coloidales”.
- Son soluciones muy viscosas.
- Las propiedades ópticas de los sistemas coloidales son: el *Efecto Tyndall* (fenómeno físico a través del cual se hace presente la existencia de partículas de tipo coloidal en las disoluciones o también en gases, debido a que éstas son capaces de dispersar la luz, apareciendo como partículas brillantes) y el *Movimiento Browniano* (movimiento aleatorio en todas direcciones de las partículas en un medio fluido).
- La importancia biológica del sistema coloidal reside en el hecho que el protoplasma de la célula, presenta desde el punto de vista fisicoquímico la estructura de un complejo estado coloidal separado del medio externo por una membrana semipermeable, la membrana plasmática.
- Tienen la propiedad de formar geles (soluciones con determinadas propiedades: viscosidad, elasticidad, resistencia a las tensiones, etc). Se sabe actualmente que la mayoría de los geles están constituidos por largas cadenas de polímeros, que forman una especie de retículo tridimensional, en el cual se halla incluida el agua. Un ejemplo típico es la gelatina (proteína), que disuelta en agua caliente forma una solución líquida llamada Sol, que está constituida por las micelas proteicas dispersas en el agua. Si se enfrían, las micelas se transforman en fase continua y las moléculas de agua se dispersan como pequeñas gotitas (fase discontinua o dispersa) formándose así una solución semisólida llamada Gel. Si se calienta el Gel vuelve a aparecer el estado de Sol. Resumiendo, cuando las gotitas de agua se dispersan en la gelatina, tenemos Gel y cuando las micelas de gelatina se dispersan en el agua, tenemos el estado de Sol. El fenómeno de solación-gelación es reversible y se produce por variación de la temperatura.
- Estabilidad: es la propiedad que poseen las micelas de mantenerse en suspensión, sin sedimentar. Este hecho sugiere que debe existir un mecanismo que interfiere o anula la influencia de la gravedad. Los factores fundamentales que inciden en la estabilidad de los coloides son: la viscosidad del medio, la repulsión electrostática de las micelas, y la hidratación o solvatación de las mismas.



Las proteínas son el ejemplo típico de las dispersiones coloidales; son consideradas moléculas anfóteras, es decir que su carga neta depende del pH del medio. Al pH normal de la sangre (7,35-7,45), levemente alcalino, la mayoría de las proteínas presentan una carga global negativa (representada "Pr<sup>-</sup>"). Las partículas de una dispersión coloidal que pueden desplazarse libremente junto con la capa de líquido que las rodea, reciben el nombre de "**micelas**" (Fig. 2.2). Esta primera capa de líquido le brinda protección impidiendo que el coloide precipite. Las moléculas de agua se comportan como dipolos eléctricos por influencia de la carga de la micela; los dipolos se orientan en la proximidad inmediata de la misma constituyendo la capa de agua "concreta". Alejándose parcialmente de la micela disminuye la influencia de la carga de ésta, y los dipolos quedan parcialmente orientados, semi desordenados, constituyendo la capa de agua difusa. Las capas de agua concreta y difusa, constituyen lo que se llama "capa de hidratación o de solvatación", alejándose más aún, la carga eléctrica de la micela no tiene acción entre los dipolos de agua, y éstos están desordenados totalmente, constituyendo el agua libre o solvente propiamente dicho.

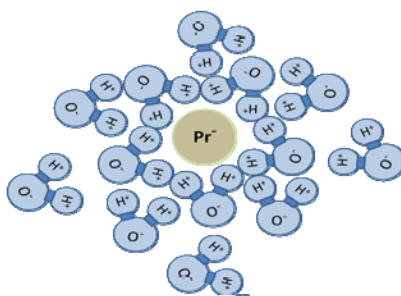


Figura 2.2: Micela coloidal.

## Concentración de una solución

### Soluciones empíricas, molares y normales

Sabemos que los compartimentos corporales son medios acuosos, ya que están compuestos en su mayor parte por agua. Pero no es solo agua lo que contienen estos compartimentos, sino que hay otras sustancias en menor proporción (solutos), en su mayoría en *solución* con el agua.

La concentración es una magnitud que se origina de la relación entre la cantidad de soluto y la cantidad de solvente de una solución. Esta magnitud es entonces relativa, ya que depende tanto del soluto como del solvente.

$$\text{Concentración} = \frac{\text{solute}}{\text{solvente}} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$$

Daremos un ejemplo simple para graficar esto: si colocamos una cucharada de sal (5g) en medio litro de agua, tendremos la misma concentración en la solución que, si colocamos dos cucharadas (10 g) en un litro de agua.

Existen diferentes formas de expresar la concentración de una solución. Se puede expresar como peso/volumen ( $p/v$ ), donde el peso representa la cantidad de soluto disuelto (generalmente expresado en gramos o sus submúltiplos), en relación al volumen de la solución (expresado en litros o sus submúltiplos).

Muchas veces se expresa como mg de soluto en 100ml de solución o, lo que es igual, mg % (aquí el por ciento representa una dilución en 100ml). Si recordamos que 100ml es igual a 1 decilitro (dl), también puede ser expresada como mg/dl. Por ejemplo, cuando queremos expresar la concentración de la glucemia (concentración de glucosa en sangre), cuyo valor se expresa como miligramos (mg) de glucosa por decilitro (dl) de sangre. Los niveles normales de glucosa en las diferentes especies animales son variables, en ayunas los valores fluctúan entre los 40 a 60 mg/dl en rumiantes (bovinos, ovinos, caprinos), y de 80 a 120 mg/dl en No rumiantes (carnívoros, equinos, cerdos, etc.).

De estos conceptos se originan otras formas de expresar la concentración como son las ***soluciones empíricas o porcentuales***:

- %  $p/v$  (porcentualidad peso en volumen): que expresa la masa de un soluto (en g) en 100 ml de solución. Ej.: solución de yodo al 2% (es decir, contiene 2 g de yodo en 100 ml de solución).
- ‰  $p/v$  (por mil peso en volumen): que expresa la masa de un soluto (en g) en 1000 ml (o un litro) de solución. Ej.: solución de NaCl al 9 ‰  $p/v$  ("solución fisiológica"), que contiene 9 g de NaCl por cada 1000 ml o un litro de solución.
- %  $p/p$  (porcentualidad peso en peso): que expresa la masa de un soluto (en g) en 100 g de solución.
- %  $v/v$  (porcentualidad volumen en volumen): que expresa el volumen de un soluto (en ml) en 100 ml de solución.

## Mol

Tanto la cantidad de gramos o miligramos son una expresión de la masa de las sustancias, pero no siempre del número de moléculas ni de las partículas que la forman. Veamos un ejemplo: la molécula de glucosa es mucho más grande que el ion sodio ( $\text{Na}^+$ ), por ende, una molécula de glucosa tiene más masa que un ion de  $\text{Na}^+$  (es decir que, un gramo de glucosa contiene muchas menos moléculas que un gramo de  $\text{Na}^+$ ). Es así que, por una cuestión práctica y para estandarizar el número de partículas se inventaron los **moles**. Entonces, **un mol** está representado por un número estándar de partículas que corresponde al número de Avogadro (es decir,  $6,02 \times 10^{23}$  partículas). Para cada sustancia, la cantidad que posee este número de átomos, iones, moléculas, etc. (es decir,  $6,02 \times 10^{23}$ ), depende del peso molecular relativo de esa sustancia expresado en gramos. Veamos algunos conceptos y ejemplos:

1 mol de una sustancia contiene  $6,02 \times 10^{23}$  partículas

1 mol = peso molecular (M) de la sustancia expresada en gramos (g)

**Ejemplo:**

$\text{NaCl} \rightarrow$  peso atómico (PA) =  $\text{Na}^+$  (23) +  $\text{Cl}^-$  (35,5) = 58,5

1 mol  $\text{NaCl}$  = 58,5gr =  $6,02 \times 10^{23}$  partículas

La misma lógica se aplica para cualquier sustancia (ej.  $\text{H}_2\text{O}$ , glucosa, etc.).

1 mol $\text{NaCl}$ = 58,5 g	} $6,02 \times 10^{23}$ partículas
1 mol $\text{H}_2\text{O}$ = 18 g	
1 mol glucosa = 180 g	

“En una solución es más importante conocer el **número de partículas** que los gramos representan, que la cantidad de gramos disueltos en la solución”.

- Vemos que, la ventaja de expresar la concentración en mol nos permite estandarizar el número de partículas de compuestos con diferentes pesos moleculares. Si tenemos en cuenta que el pasaje de agua a través de las membranas biológicas depende del número de partículas en solución, y que los moles expresan el número de partículas, entendemos lo útil de emplear estas medidas a la hora de expresar las soluciones.

## Molaridad

Es una forma de expresar la concentración teniendo en cuenta el número de moles disueltos en un litro (1000ml) de solución. Como en el organismo las concentraciones de solutos son muy bajas, es frecuente encontrar la concentración expresada en mmol/l (milimol en un litro) de solución. Siguiendo con el ejemplo del NaCl, una solución de NaCl 1 molar (1M) nos dice que la solución contiene 1 mol de NaCl por cada litro de solución.

Por otro lado, cuando se expresa la concentración en moles o milimoles por "Kg" de solución, hablamos de *Molalidad*. Por ejemplo, una solución 1 molal (1*m*) de cloruro de potasio (KCl) indica que la solución contiene 1 mol de KCl en 1000g (1Kg) de solución. Por lo general la *Molalidad* se utiliza para la expresión de soluciones muy concentradas (donde hay gran cantidad de solutos) y la relación soluto/solvente es mayor.

## Normalidad

Esta es una forma de expresar el número de equivalentes gramo de soluto por litro de solución. Ahora bien, ¿qué es un equivalente gramo?

Sabemos que los líquidos corporales están compuestos por sustancias electrolíticas capaces de separarse en iones en una solución. Veamos algunos ejemplos de sales y cómo se disocian:

- $\text{HCl} \longrightarrow \text{H}^+ + \text{Cl}^-$
- $\text{CaCl}_2 \longrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{Cl}^-$
- $\text{NaOH} \longrightarrow \text{Na}^+ + \text{OH}^-$
- $\text{NaCl} \longrightarrow \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$
- $\text{Na}_2\text{SO}_4 \longrightarrow 2\text{Na}^+ + \text{SO}_4^{2-}$

Los iones son partículas cargadas eléctricamente donde la cantidad de carga depende de la valencia. Recordemos que, hablamos de "iones monovalentes" cuando ganan (aniones) o pierden (cationes) 1 electrón, por otro lado, llamamos "iones divalentes" a aquellos que hayan ganado o perdido 2 electrones. Por ejemplo, el  $\text{Na}^+$ , el  $\text{K}^+$ , el  $\text{Cl}^-$  y el bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) tienen valencia uno (iones monovalentes) comparada con el  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{Mg}^{2+}$  que poseen valencia dos (iones divalentes). Es conveniente entonces encontrar una manera de expresar el número de valencias que hay en una determinada masa de sustancia. El mol ya no nos es tan útil porque, como se vio, en 1 mol de una sustancia puede haber el doble de valencias que en 1 mol de otra, a pesar de tener el mismo número de iones (por ejemplo 1 mol de  $\text{Na}^+$  y 1 mol de  $\text{Ca}^{2+}$ ).

Es así que, para expresar este valor de valencia eléctrica se utiliza el llamado “equivalente eléctrico del ión” (en realidad se usa el miliequivalente (mEq), o sea, la milésima parte de éste).

Entonces, en vez de expresar la concentración en términos de molaridad (mol/l), sería más correcto expresar la concentración iónica en mEq/L.

Podemos hablar de “*equivalente gramo*” haciendo referencia al peso atómico (PA) de un ion, expresado en gramos, dividido por su valencia:

$$\text{Equivalente gramo (Eq)} = \frac{PA_{ion}}{\text{Valencia}}$$

Por lo general para los elementos de valencia uno (iones monovalentes), los mEq/L son iguales a los mmol/l (por ejemplo, para el Na<sup>+</sup> plasmático 142 mEq/L, es igual a decir 142 mmol/l). En cambio, para el Ca<sup>2+</sup> (que posee valencia dos), un mmol es igual a dos mEq.

## Compartimentos corporales

Comencemos por definir el concepto de **homeostasis** (del griego *homos*, ‘similar’, y *stasis*, ‘estado’ o ‘estabilidad’). Es la propiedad que poseen los organismos vivos de mantener una condición interna estable, compensando los cambios en su entorno mediante el intercambio regulado de materia y energía con el exterior (metabolismo), es decir, es una forma de equilibrio dinámico que se hace posible gracias a una red de sistemas de control y que constituyen los mecanismos de autorregulación de todos los seres vivos. Algunos ejemplos de mecanismos homeostáticos pueden ser la regulación de la temperatura corporal y el balance ácido/base (pH).

Un aspecto importante de la homeostasis es el mantenimiento del volumen y la composición de los líquidos corporales. Como se comentó anteriormente, los líquidos corporales son básicamente soluciones (sales disueltas en agua) con proteínas y lípidos en suspensión, que se encuentran tanto dentro de la célula como también a su alrededor.

Para poder comprender el complejo funcionamiento del organismo, es conveniente utilizar modelos simples y conceptos que nos permitan integrar:

- Sabemos que el 60-65% del organismo está compuesto por agua y, desde el punto de vista fisicoquímico, puede ser considerado una solución cuyo solvente es el agua y cuyos solutos son el sodio, el cloruro, el potasio, las proteínas, la glucosa, la urea, etc., que se encuentran disueltos en ella.
- Puede considerarse al organismo como una máquina capaz de transformar una forma de energía en otra, ya que toma la energía química almacenada en los alimentos y la utiliza

para producir *calor* y *trabajo*. Por ejemplo, se liberará calor siempre que se realice un trabajo y se necesitará energía para mantener la temperatura corporal estable (dentro de ciertos parámetros fisiológicos) en relación a la temperatura ambiente (animales homeotermos). Necesariamente ocurrirá un gasto de energía cuando se produzca la contracción de un músculo, cuando se respire, cuando la sangre circule, cuando se digiera un alimento, etc. En algunos casos se gastará energía cuando se quiera mantener una diferencia de concentración de un ion, por ejemplo, entre ambos lados de una membrana celular.

## **Tipos de membranas en función de su permeabilidad**

Las membranas son estructuras formadas por dos láminas (bicapa lipídica) de fosfolípidos, glucolípidos y proteínas que rodean, limitan y contribuyen a mantener el equilibrio entre el interior (medio intracelular) y el exterior (medio extracelular) de las células. Regula la entrada y salida de muchas sustancias entre el citoplasma y el medio extracelular y de acuerdo a su permeabilidad las podemos clasificar en:

- **Permeables:** aquellas que permiten el pasaje de solutos y solventes.
- **Semipermeables:** permiten solo el pasaje de solventes y algunos solutos (de permeabilidad selectiva).
- **Impermeables:** no permiten el pasaje de solutos ni solventes.

Una vez que, a fines prácticos, entendemos al animal como un sistema, es necesario precisar sus límites, es decir, lo que está “adentro” y lo que está “afuera”. Podemos representarlo como un gran **compartimiento** que está separado del exterior por *epitelios*. Así, la mucosa del tracto digestivo, la del aparato respiratorio y la del sistema renal representan los “límites” de este compartimiento corporal, y es a través de estos epitelios que intercambia agua, sales, oxígeno, dióxido de carbono, calor, glucosa y todo lo que necesita para sostener la vida.

Cuando un animal ingiere su alimento, esto seguirá estando "afuera" hasta que no haya pasado el epitelio intestinal y, una vez atravesado el epitelio, se encontrará "adentro", en el interior del compartimiento corporal. Lo mismo sucede en el caso de la orina, está fuera del compartimiento corporal desde el momento que sale del extremo distal de los túbulos colectores renales, aún cuando después se almacene en la vejiga (Fig. 2.3).

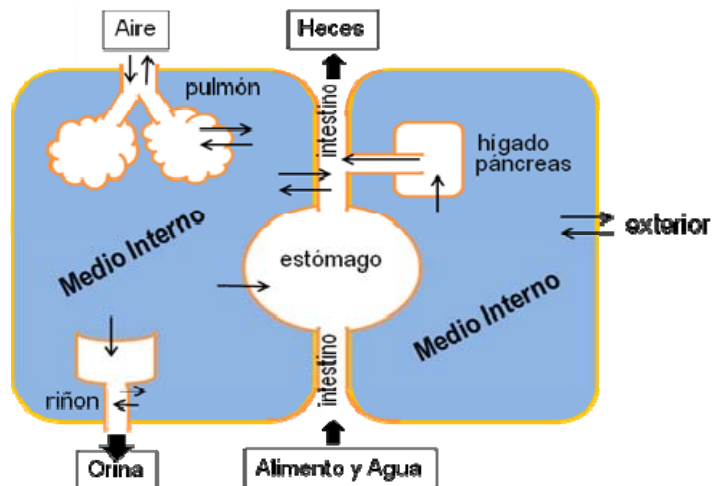


Figura 2.3: Representación del organismo como un sistema de compartimentos separado del exterior por epitelios.

Existen divisiones dentro de este gran compartimento corporal, constituido en su mayor parte por agua. El líquido contenido dentro de las células se denomina *líquido intracelular* (*intra*, dentro), y se abrevia **LIC**. El líquido que se encuentra por fuera de las células, es el *líquido extracelular* (*extra*, fuera), y se abrevia **LEC**. La composición y denominación del LEC varía en las distintas partes del cuerpo. El LEC que se encuentra en los estrechos espacios entre células, bañando a cada una, se conoce como *líquido intersticial* (*inter*, entre). El LEC dentro de los vasos sanguíneos se denomina *líquido intravascular* (haciendo referencia al *plasma*, ya que los elementos formes de la sangre son células, y dentro de ellas hay LIC). Una porción muy pequeña del LEC se conoce como *líquido transcelular*, representado por los fluidos orgánicos especializados. Estos corresponden aproximadamente al 2,5% del total del agua corporal, e incluye al líquido cefalorraquídeo (rodeando al encéfalo y medula espinal), al líquido sinovial (en las articulaciones), al humor acuoso del ojo, las secreciones digestivas, etc.

El adecuado funcionamiento de todas las células del cuerpo depende de la precisa regulación de la composición del líquido que las rodea. En la idea de que todas las células del cuerpo viven rodeadas de líquido extracelular, fue que el fisiólogo Claude Bernard creó el término de **“Medio Interno”**, que representa a este líquido extracelular (LEC).

Ahora bien, intentemos pensar al cuerpo como el conjunto de compartimentos líquidos separados por membranas. El mayor volumen de estos compartimentos está dado por el agua (componente más importante de la célula). El agua representa aproximadamente el 60-65% del peso corporal total (PCT) de un adulto, y un 75-80% de un neonato (recién nacido) (Fig. 2.4).

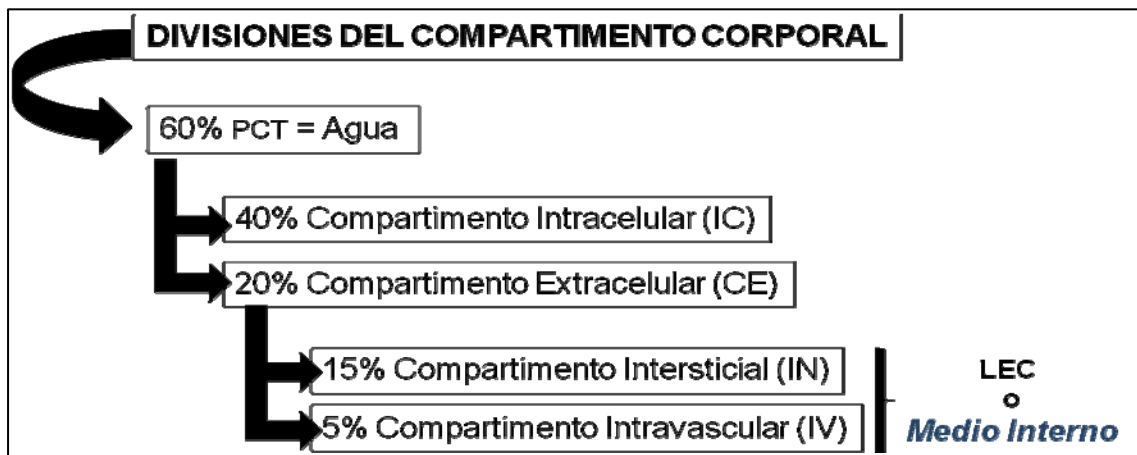


Figura 2.4: Distribución del agua corporal total

La composición iónica en los diferentes compartimentos corporales, es distinta. Veamos y analicemos el siguiente cuadro:

	LIC	LEC	
		L inst.	PLASMA
<b>Cationes (mEq/L)</b>			
Na <sup>+</sup>	10	145	142
K <sup>+</sup>	140	4	4
Ca <sup>+</sup>	< 1	3,5	5
Mg <sup>+</sup>	40	1	1
<b>Aniones (mEq/L)</b>			
Cl <sup>-</sup>	3	117	100
Proteinatos <sup>-</sup>	50	< 2	20
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10	27	24
Fosfatos <sup>-</sup>	100	2	2

Cuadro 1. Volumen y composición de los líquidos intracelular y extracelular.

- Podemos observar que la concentración de proteínas es mayor en el líquido intracelular (LIC). Recordemos que las proteínas en solución y al pH fisiológico (7,35-7,45), presentan carga negativa (anión), y sumado a su tamaño la hacen un *anión no difusible*.
- Con respecto al Na<sup>+</sup> y Cl<sup>-</sup>, las concentraciones son mayores en el líquido extracelular (LEC).
- En el caso del K<sup>+</sup>, la concentración es mucho mayor en el líquido intracelular (LIC).
- La concentración de Ca<sup>2+</sup> es mil veces inferior en el líquido intracelular (LIC) con respecto al extracelular (LEC).
- Los Fosfatos (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) están más concentrados en el líquido intracelular (LIC).



## Gradiente. Difusión. Flujo. Ley de Fick

Anteriormente mencionamos que los organismos están conformados por una serie de compartimientos acuosos rodeados por membranas con diferente concentración iónica; entre ellos se puede observar la existencia de gradientes que son los que determinan los flujos de masa y de energía en el sistema. Definimos **gradiente** como la variación de una cierta magnitud en función de la distancia.

Para poder observar un desplazamiento de agua y/o solutos a través de una membrana semipermeable es necesaria la presencia de una fuerza impulsora que origine este pasaje (movimiento). Podemos encontrar gradientes de distintas clases, gradiente de concentración o químico, eléctrico, electroquímico y osmótico, los cuales iremos detallando en los sucesivos temas.

Cuando existe una diferencia de concentración entre dos puntos de un sistema, o entre dos soluciones separadas por una membrana, habiendo en ambos casos una determinada distancia entre ellos, estamos en presencia de un **gradiente químico**. Por ejemplo, existe un gradiente químico para el ión  $\text{Na}^+$  si comparamos su concentración en el medio intracelular (14 mEq/L) y el extracelular (142 mEq/L). En este último caso, la distinta distribución de este ión a ambos lados de la membrana también genera un **gradiente eléctrico**, ya que los iones poseen una determinada carga eléctrica, por lo tanto, se genera un **gradiente electroquímico** (concepto que profundizaremos en el Capítulo 3).

Todas las moléculas e iones disueltos se encuentran en constante movimiento, el cual va a ser directamente proporcional a la temperatura del medio (movimiento térmico). La **difusión** es un proceso en el cual las moléculas en solución ocupan todo el volumen disponible debido al movimiento térmico (fuerza impulsora). Este movimiento es constante y azaroso. O sea, debido a la difusión las moléculas tenderán a esparcirse uniformemente a través del espacio que se encuentra a su disposición; por ejemplo, si colocamos un terrón de azúcar en un vaso con agua, veremos que luego de un tiempo las moléculas de sacarosa difundirán hasta homogeneizar su concentración en todo el vaso. Para que ocurra este fenómeno la distribución espacial de las moléculas debe ser heterogénea, el desplazamiento va a estar afectado por las diferencias de concentración de soluto, las moléculas se moverán predominantemente desde donde están en mayor concentración hacia donde se encuentran en menor concentración.

Si cuantificamos el número de moléculas que se mueven de un lugar a otro o que atraviesan la membrana en una unidad de tiempo tendremos el **flujo (J)**. Podemos expresarlo como la cantidad de sustancia (en moles), que atraviesa una determinada sección perpendicular a la dirección de desplazamiento por unidad de tiempo. Así, por ejemplo, si las concentraciones de soluto en dos compartimientos (1 y 2) separados por una membrana, son iguales existirá un flujo unidireccional de 1 hacia 2 y otro flujo unidireccional de 2 hacia 1 de igual magnitud. Pero, cuando existe una diferencia de concentración entre los dos compartimientos, existirá un **flujo neto de difusión**, dado por la diferencia de ambos flujos unidireccionales (Fig. 2.5):

$$J_{neto} = J_{1-2} - J_{2-1}$$

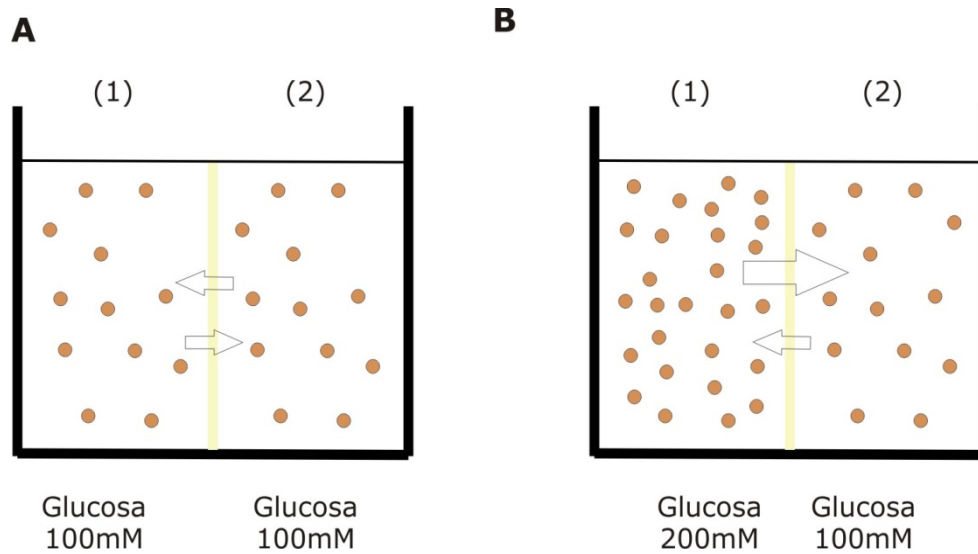


Figura 2.5: A. En dos compartimentos separados por una membrana semipermeable, en los cuales se presenta igual concentración de soluto, los flujos son de igual magnitud. B. En el compartimento 1, donde la concentración de soluto es mayor, predomina el flujo de 1 hacia 2.

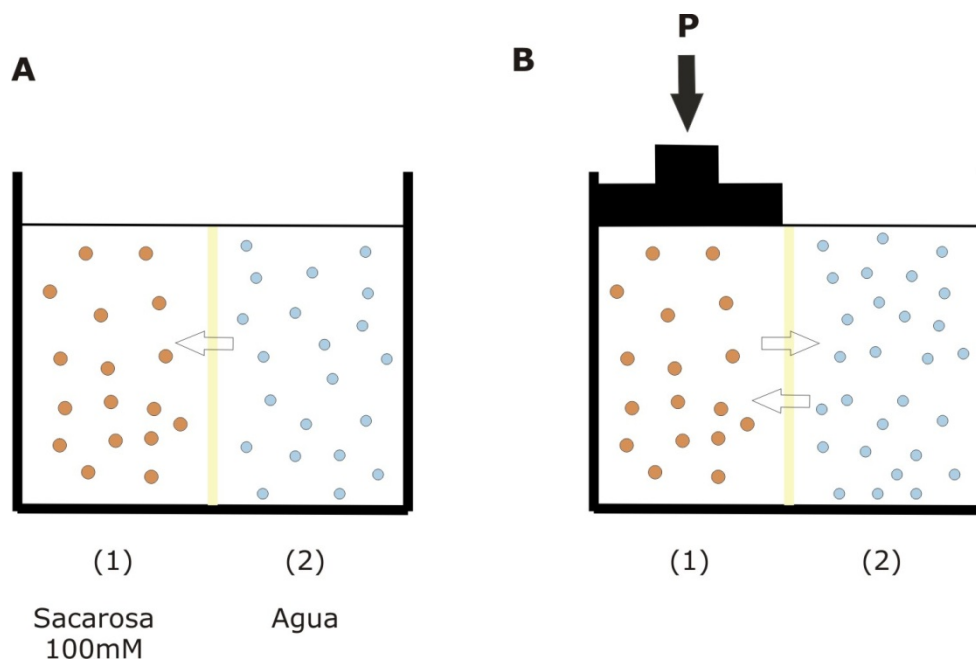
La **ley de Fick** es la que establece los factores de los que depende la magnitud del flujo neto de difusión. Si entre dos puntos de un sistema (A y B) existe una diferencia de concentración, la variación de la concentración del soluto ( $\Delta C$ ) en función de la distancia que los separa ( $\Delta X$ ) representa el gradiente de concentración. En el caso más simple, existe una variación lineal de la concentración en función de la distancia a temperatura constante. La magnitud del flujo neto de difusión ( $J$ ) será directamente proporcional a la diferencia de concentración del soluto e inversamente proporcional a la distancia que separa los dos puntos en los cuales medimos la concentración de soluto. De esta manera:

$$J = \frac{D \cdot A \cdot \Delta C}{\Delta X}$$

En esta ecuación **D** representa el coeficiente de difusión, que es característico de la especie que difunde y del medio en el cuál se encuentra. Se expresa en  $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  y da cuenta de la resistencia que ofrece la solución al movimiento del soluto. **A** es el área a través de la cual se da el pasaje ( $\text{cm}^2$ ).  **$\Delta C$**  es la diferencia de concentración entre los puntos ( $\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) y  **$\Delta X$**  es la distancia que separa estos dos puntos (cm), ( **$\Delta C / \Delta X$**  = gradiente de concentración de la especie que difunde).

## Osmosis, presión osmótica y osmolaridad

Imaginemos dos compartimientos separados por una membrana semipermeable que selectivamente permite sólo el pasaje de agua. Si consideramos que el compartimiento 1 contiene una solución de sacarosa a una concentración de 100 mM y el compartimiento 2 contiene agua pura, se observará un pasaje neto de agua desde el 2 hacia el 1, este proceso se conoce como **ósmosis**, durante la cual el agua se mueve hacia la solución más concentrada. Como resultado el número de moléculas de agua en el compartimiento 1 aumenta y la solución de sacarosa se hace más diluida. Si cerráramos con un pistón el compartimiento 1 y ejerciéramos presión hacia abajo, para un determinado valor de presión el flujo de agua de 2 hacia 1 no aparecerá. Esto demuestra que la diferencia de concentración entre 1 y 2 estaba generando un flujo neto de agua de 2 hacia 1 y como consecuencia una diferencia de presión hidrostática, que es una medida de la **presión osmótica** (Fig. 2.6).



*Figura 2.6: A. Pasaje de agua hacia el compartimiento que posee mayor concentración de soluto. B. La presión ejercida sobre la solución presente en el compartimiento 1 frena el flujo neto de 2 hacia 1.*

Entonces podemos definir **ósmosis** como el pasaje espontáneo de agua desde una solución más diluida a una más concentrada, cuando ambas soluciones están separadas por una membrana semipermeable. Así mismo, la **presión osmótica** se define como la presión que debe aplicarse a una solución para impedir el pasaje de solvente hacia ella, cuando los dos líquidos se encuentran separados por una membrana semipermeable. La ósmosis cumple un

rol muy importante en los procesos fisiológicos de plantas y animales, en estos últimos adquiere gran relevancia a nivel de la piel, intestino grueso y riñones.

Existen semejanzas entre el comportamiento de las moléculas de agua en la ósmosis y el comportamiento de las moléculas de los gases en la difusión. En estos dos procesos las moléculas difunden desde regiones de altas concentraciones a regiones de baja concentración. Fue así que Jacobus Van't Hoff descubrió la relación:

$$\pi \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Donde  $\pi$  es la presión osmótica (en atm),  $n$ , es el número de moles disuelto en un volumen  $V$  (en litros),  $T$  es la temperatura absoluta en °K y  $R$  es la constante de los gases (0,082 litros. atm/ K. mol). La ecuación puede escribirse también de la siguiente forma:

$$\pi = \frac{n \cdot R \cdot T}{V}$$

Como  $n = m/M$  (masa en g / Peso Molecular), podremos decir que:

$$\pi = \frac{m \cdot R \cdot T}{M \cdot V}$$

Además, como  $n/V$  representa el número de moles de soluto por litro de solución, que es la molaridad (C), podremos decir que:

$$\pi = C \cdot R \cdot T$$

Ahora bien, si consideramos una solución electrolítica en la cual el soluto es ionizable, disociándose en dos o más partículas al estar disuelto, tenemos que introducir otro término en la fórmula ya que la presión osmótica va a depender del número de partículas en solución. Introducimos entonces el factor  $i$  de Van't Hoff, que indica el número de partículas en las que se disocia una molécula de un electrolito en solución. Entonces calcularemos la presión osmótica de este modo:

$$\pi = i \cdot C \cdot R \cdot T$$

Por ejemplo, para la glucosa o sacarosa el coeficiente  $i$  es igual a 1 ya que estos azúcares no se disocian en solución. Pero para el caso de electrolitos que se disocian en dos iones (por ejemplo, el NaCl),  $i$  vale 2, y para electrolitos que se disocian dando tres iones,  $i$  será igual a 3 (por ejemplo, el CaCl<sub>2</sub>, que al disociarse produce un ión Ca<sup>2+</sup> y dos Cl<sup>-</sup>).

En Medicina Veterinaria, muchas veces debemos utilizar distintas soluciones con el propósito de realizar una fluidoterapia. Para saber qué solución se debe aplicar no sólo debemos tener en cuenta la patología del paciente sino el posible efecto que tendrá dicha solución al ingresar al interior del Medio interno. En función de la diferente presión osmótica que presentan las soluciones pueden clasificarse en: hipotónicas, isotónicas e hipertónicas. En

las primeras, la solución tiene una presión osmótica menor que otra, por ejemplo, el interior de los glóbulos rojos con los que tomará contacto. En este caso los elementos celulares puestos en contacto con un medio que tenga menor presión osmótica que la del contenido celular, absorben agua, por consiguiente, aumentan de volumen. Dicho incremento depende de la hipotonicidad de la solución: si ésta es suficientemente hipotónica, el glóbulo pierde su capacidad para retener la hemoglobina y se produce la hemólisis. La presión osmótica en la cual se produce este fenómeno se conoce clínicamente como punto de fragilidad.

Una solución hipertónica dará lugar al proceso inverso, perdiendo la célula agua, la cual se dirigirá al medio, dando lugar así a que disminuya el volumen celular, produciéndose la crenación del glóbulo.

Si el medio no ocasiona alteración de los elementos celulares, se debe a que la solución es isotónica con la sangre, como ocurre por ejemplo con la solución fisiológica de ClNa al 8.5 g ‰.

Ante la necesidad de definir precisamente la presión osmótica de ciertas soluciones, especialmente las de importancia biológica, se define una nueva forma de expresar concentración: la **osmolaridad**. Entonces podríamos definir al **osmol** como un **mol de partículas osmóticamente activas**. Así, la osmolaridad nos indica el número de osmoles de soluto por cada litro de solución. Por ejemplo, decimos que una solución es **1 osmolar (1 OsM)** cuando contiene un osmol de soluto en un litro de solución. Ahora bien, sabemos que la expresión de la concentración de una sustancia como moles o equivalentes, no nos está definiendo el número de “partículas osmóticamente activas”. Es decir, para la glucosa en solución, el número de partículas osmóticamente activas en 1 mol es de  $6,02 \times 10^{23}$ , pero para el NaCl que se disocia en casi dos partículas, ese número es del doble, y en el caso del  $\text{CaCl}_2$  sería casi el triple. Es por eso que cuando definimos esta propiedad, el número de partículas en una solución se expresa mejor en osmoles o miliosmoles/l. Es decir que un osmol es igual a un mol por el número de partículas en las que se disocia la molécula.

$$OsM = M \cdot i$$

Donde OsM es la osmolaridad de la solución en Osmoles; M es la Molaridad en Moles; i es el factor de van't Hoff.

- En el caso de moléculas No electrolíticas como la glucosa:

Una Solución 1M de glucosa = 1 Osm de glucosa/l = 1OsM (osmolar) de glucosa.

- En el caso de Electrolitos:

Una Solución 1M de NaCl =  $1M \cdot 2 = 2 \text{ OsM}$  de NaCl.

Una Solución 1M de  $\text{CaCl}_2 = 1M \cdot 3 = 3 \text{ OsM}$  de  $\text{CaCl}_2$ .

Como las concentraciones de soluto en los líquidos corporales son muy pequeñas, suele expresarse en *milimoles (mmol)* y *miliosmoles (mOsm)*. Entonces, 1 mmol de glucosa genera una osmolaridad de 1 mOsm/L; 1 mmol de NaCl genera una osmolaridad cercana a los 2 mOsm/L, y en el caso del CaCl<sub>2</sub>, 1 mmol nos da una osmolaridad cercana a 3 mOsm/L.

Para concluir, retomando el concepto de gradiente visto anteriormente, cuando existe una diferencia de osmolaridad entre dos soluciones separadas por una membrana semipermeable estamos en presencia de un **gradiente osmótico**.

## Transporte a través de la membrana celular

Los distintos mecanismos de transporte a través de la membrana celular cumplen una función dinámica para mantener un medio en el que puedan transcurrir las distintas reacciones bioquímicas necesarias para el mantenimiento de la vida.

El mantenimiento del ambiente interno de la célula y sus partes constitutivas requiere que la membrana celular desempeñe una función compleja: debe evitar la entrada de ciertas sustancias y permitir el ingreso de otras e inversamente debe retener ciertas sustancias en el interior y permitir la salida de otras. La capacidad de una membrana para desempeñar esta función depende de características que resultan de su estructura lipídica y proteica, y también de las propiedades físico-químicas de las sustancias que entran en interacción con la membrana. La misma constituye una barrera selectiva, es decir, muestra una permeabilidad diferencial, por lo que permite el paso de algunas sustancias mientras que excluye el de otras. Cuando las sustancias atraviesan la membrana plasmática sin ningún gasto de energía por parte de la célula se dice que ocurre **transporte pasivo**. Cuando la célula debe suministrar energía metabólica para que las sustancias sean conducidas al otro lado de la membrana, el proceso seguido se denomina **transporte activo**.

## Transporte pasivo

Constituye el pasaje de moléculas a través de la membrana plasmática debido a la existencia de una diferencia de concentración entre ambos lados de la membrana, dándose un flujo neto desde el sitio de mayor concentración hacia el de menor concentración. Podemos distinguir dos tipos de transporte pasivo: **difusión simple** y **difusión facilitada** (Fig 2.7).

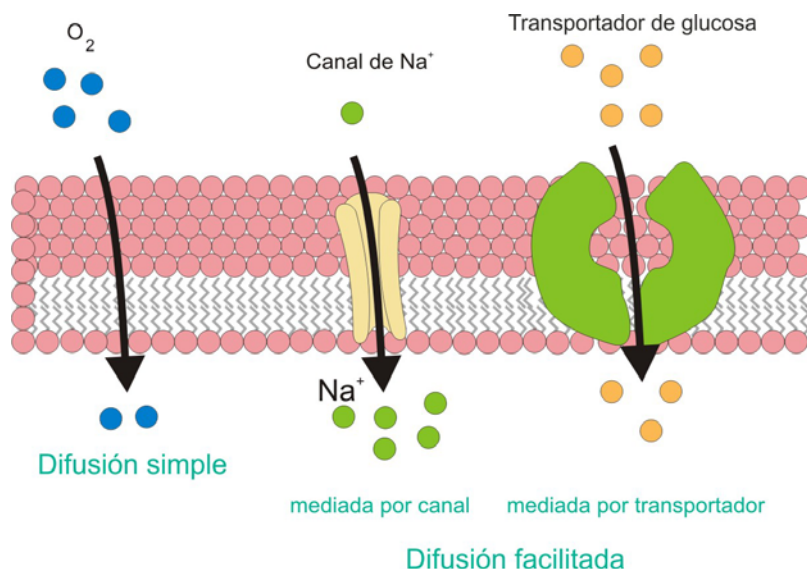
En la **difusión simple** el pasaje es linealmente proporcional a la diferencia de concentración, podemos decir que las moléculas que se transportan por difusión simple son solubles en la membrana, en este caso la agitación térmica de las moléculas es suficiente para

provocar el pasaje (por ejemplo, los gases respiratorios, las moléculas solubles en lípidos como las hormonas esteroides, etc).

Se transportan por **difusión facilitada**, moléculas poco permeables o impermeables a la bicapa lipídica; este tipo de transporte se realiza a través de otras moléculas que facilitan su pasaje (canales o transportadores). La difusión facilitada se diferencia de la simple por ser altamente específica para diferentes moléculas e iones, por ser más rápida y por presentar cinética de saturación. Esto último implica que una vez que los transportadores se saturan el flujo alcanzará un valor máximo, aunque la diferencia de concentraciones aumente.

Como la permeabilidad a los iones de la bicapa lipídica es muy baja, los electrolitos pequeños ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) se transportan gracias a la difusión facilitada a través de canales, los cuales son estructuras proteicas que atraviesan la membrana. Estos pueden sufrir cambios en su conformación que les permiten pasar de un estado abierto a uno cerrado, siendo selectivos en mayor o menor medida para un determinado ión. La regulación de la permeabilidad puede realizarse abriendo o cerrando canales o modificando el número de los mismos.

En la difusión facilitada a través de proteínas transportadoras la molécula transportada tiene alta afinidad por el transportador en el cual se va a fijar, posteriormente éste sufre un movimiento que traslada a la sustancia transportada hacia el otro lado de la membrana. La posibilidad de que haya un movimiento neto depende de la existencia de un gradiente químico como en la difusión simple, aunque en este caso el pasaje tiene mayor especificidad y el mecanismo puede saturarse ya que el número de moléculas transportadoras es limitado. Es ejemplo de este tipo de transporte el transportador de glucosa, que permite el ingreso de la misma hacia las células para poder utilizarla como fuente de energía. Este tipo de transporte se denomina también uniport ya que la proteína transporta un único soluto del otro lado de la membrana.



## TRANSPORTE PASIVO

Figura 2.7: Ejemplos de transporte pasivo

### Transporte activo

En este tipo de transporte las moléculas se transportan en contra de un gradiente químico o electroquímico en el caso de un ión, para lo cual se requiere un gasto de energía metabólica o del desplazamiento de otras especies químicas. A continuación, detallaremos los dos tipos de **transporte activo: primario y secundario** (Fig 2.8).

En el **transporte activo primario** el proceso de transporte es realizado gracias al consumo de energía metabólica, transportando iones o moléculas en contra de su gradiente químico o electroquímico. Uno de los ejemplos fundamentales de este tipo de transporte es el de la bomba  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ . La célula mantiene una alta concentración de  $\text{K}^+$  y baja concentración de  $\text{Na}^+$ , generando gradientes iónicos que se utilizarán para realizar otros tipos de transporte. Esta bomba está constituida por una proteína que atraviesa la membrana celular, denominada ATPasa  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ , ya que en el proceso de transporte se mueven tres iones  $\text{Na}^+$  hacia el medio extracelular y dos iones  $\text{K}^+$  hacia el intracelular por cada molécula de ATP hidrolizada para aportar la energía metabólica necesaria.

Existen numerosos ejemplos de bombas, podemos citar la bomba de  $\text{H}^+$  presente en el epitelio estomacal, necesaria para que pueda degradarse el alimento; la bomba de  $\text{Ca}^{2+}$  presente en el retículo sarcoplásmico, siendo este ión fundamental para que se produzca la contracción de las fibras musculares, etc.

En el **transporte activo secundario**, a diferencia de lo que ocurre en el primario, la energía utilizada es almacenada como gradiente electroquímico. Se pueden diferenciar dos tipos de transporte activo secundario:



Contratransporte (antiport): Este es un mecanismo de transporte acoplado en el que se puede transportar una especie en contra de su gradiente electroquímico a expensas de la energía aportada por el transporte de otra especie que se desplaza en sentido contrario y a favor de un gradiente. Por ejemplo, el transporte de  $\text{Na}^+/\text{H}^+$  o de  $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ .

Cotransporte (simport): También es un mecanismo acoplado de transporte que puede mover una especie en contra de su gradiente de concentración gracias a la energía suministrada por el transporte de otra especie a favor de un gradiente y en el mismo sentido que la primera. Por ejemplo, el transporte de  $\text{Na}^+$ /glucosa.

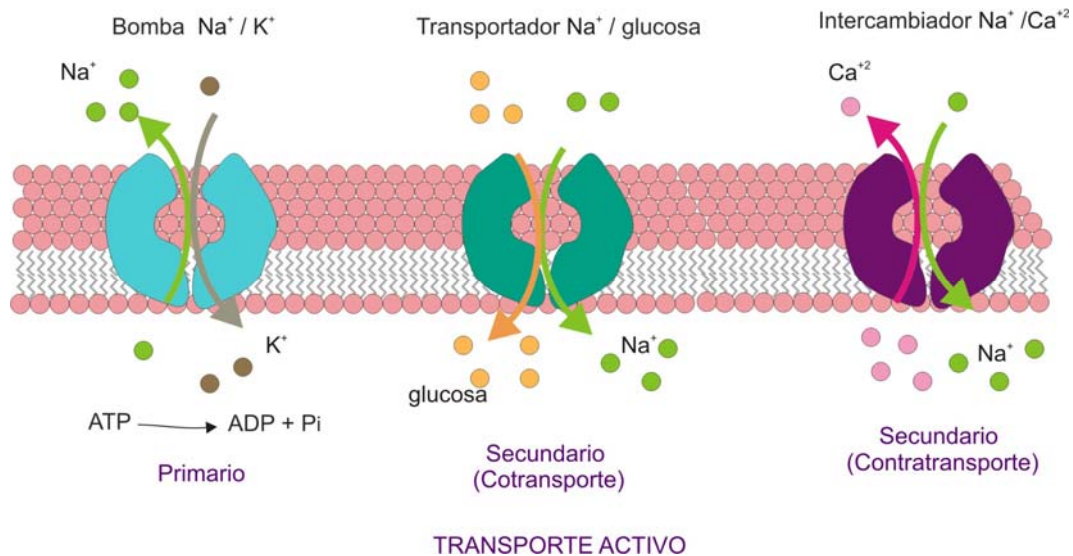


Figura 2.8: Ejemplos de transporte activo.

## Equilibrio de Donnan

Para comprender este concepto y acercarnos más a un ejemplo biológico debemos introducir la presencia de elementos cargados que no puedan atravesar la membrana en nuestro sistema de dos compartimentos separados por una membrana semipermeable. La misma posee permeabilidad selectiva, pudiendo ser atravesada por iones pequeños como el  $\text{Cl}^-$  y el  $\text{K}^+$  pero no por proteínas ( $\text{A}^-$ ).

En el compartimiento 1 tenemos  $\text{KCl}$  y el compartimiento 2 contiene  $\text{K}^+$  más el anión no permeable  $\text{A}^-$  (por ejemplo una proteína, macromolécula con carga negativa que no puede difundir). Los dos compartimentos poseen igual concentración inicial.

Pasado un tiempo y debido a la presencia de un gradiente químico para el  $\text{Cl}^-$ , habrá pasaje de este ión del 1 hacia el 2. Esto origina un potencial de difusión que induce el pasaje de  $\text{K}^+$  en la misma dirección, ya que para mantener el equilibrio el número total de cargas positivas y

negativas tienden a igualarse. Este fenómeno está descrito en el principio de electroneutralidad, el cual enuncia que en una solución iónica la carga total de iones negativos tiende a ser igual que la carga de iones positivos, permaneciendo así la solución eléctricamente neutra. Por lo tanto, en el compartimiento 1 se presentará esta igualdad:

$$[K^+]_1 = [Cl^-]_1$$

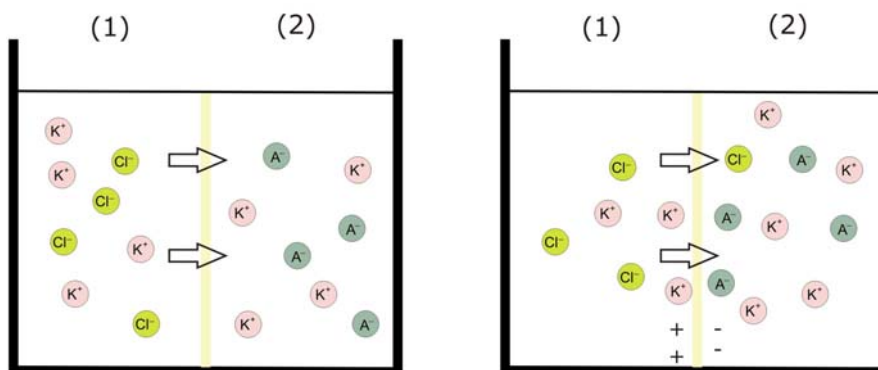
Mientras que en el compartimiento 2:

$$[K^+]_2 = [Cl^-]_2 + [A^-]_2$$

Por lo tanto, en este equilibrio la presencia de un ión no difusible genera una asimetría en la distribución de los iones difusibles lo que induce la aparición de un potencial eléctrico; cada uno de los iones estará en equilibrio electroquímico y deberá cumplirse que:

$$[K^+]_2 \cdot [Cl^-]_2 = [K^+]_1 \cdot [Cl^-]_1$$

Esta es la ecuación de Donnan y el potencial que mencionamos se lo conoce como potencial de equilibrio de Donnan (Fig. 2.9).



*Figura 2.9: Equilibrio de Donnan. La presencia de un ión no difusible en el compartimiento 2 produce una asimetría en la distribución de los iones difusibles, generando un potencial eléctrico.*

## Referencias

- Castellote S. B. (1995) Fisiología del nervio. En: A. García Sacristán *Fisiología Veterinaria (1ra edición)* (pp. 16-20). Madrid, España: McGraw-Hill Interamericana de España
- Cisale H. (2011). Membrana celular y transporte. En: H. Cisale. *Física Biológica Veterinaria (2º edición)* (pp. 89-112). Buenos Aires: Editorial Eudeba.
- Curtis H. Barnes N.S. (1993). Capítulo 6: Cómo entran y salen sustancias de las células. En: H. Curtis; N.S. Barnes. *Biología (5º edición)* (pp. 152-162). Buenos Aires: Editorial Médica Panamericana.
- Guyton C. A. Hall J. E. (2001). Capítulo 25. En: En C. A. Guyton y J. E. Hall (Eds.), *Tratado de fisiología médica (10ma edición)* (pp. 291-305). México: Mc Graw-Hill. Interamericana Editores S.A. de C.V.
- Jaitovich A (2010). Capítulo 2: Tráfico de sustancias a través de la membrana celular. En: Best & Taylor. *Bases Fisiológicas de la Práctica Médica (14ta edición)* (pp. 41-50). Buenos Aires: Editorial Médica Panamericana.
- Mortimer C. (1983). Capítulo 10: Soluciones. En: C. Mortimer. *Química* (pp 253-282). México: Grupo Editorial Iberoamérica.
- Parisi M. (2001). Capítulo 3. Los grandes mecanismos disipativos y sus fuerzas impulsoras. En: M. Parisi. *Temas de Biofísica* (pp. 53-66). Santiago, Chile: Mc Graw-Hill/ Interamericana de Chile LTDA.
- Parisi M. (2001). Capítulo 4. Las barreras biológicas. En: M. Parisi. *Temas de Biofísica* (pp. 67-75). Santiago, Chile: Mc Graw-Hill/ Interamericana de Chile LTDA.

# CAPÍTULO 3

## Biofísica de la actividad neuronal animal

*Fernanda Coll Cárdenas, Francisco Pellegrino, Joaquín*

*Bruzzo Lafratto*

En el organismo animal, el sistema nervioso tiene como función conducir la información que proviene desde el interior del cuerpo (algún órgano o tejido) o desde el exterior (a través de los órganos de los sentidos), para que sea el cerebro quien la procese y actúe. Esta señal es traducida convirtiéndose en una señal eléctrica, ocurriendo esta traducción gracias a los llamados Tejidos excitables y caracterizándose por la velocidad de su conducción (aproximadamente de  $30\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ); así por ejemplo, cuando un animal reacciona ante una pinchadura (estímulo detectado por receptores del dolor), esta información llegará por vía aferente (sensitiva) a los centros del Sistema Nervioso Central quienes serán los encargados de traducir rápidamente la información y por vía eferente (motora) producir la retirada del miembro en fracciones de segundo (Fig. 3.1).

Debido a esto, en este capítulo trataremos diferentes definiciones eléctricas, con el fin de comprender lo que ocurre a nivel orgánico.

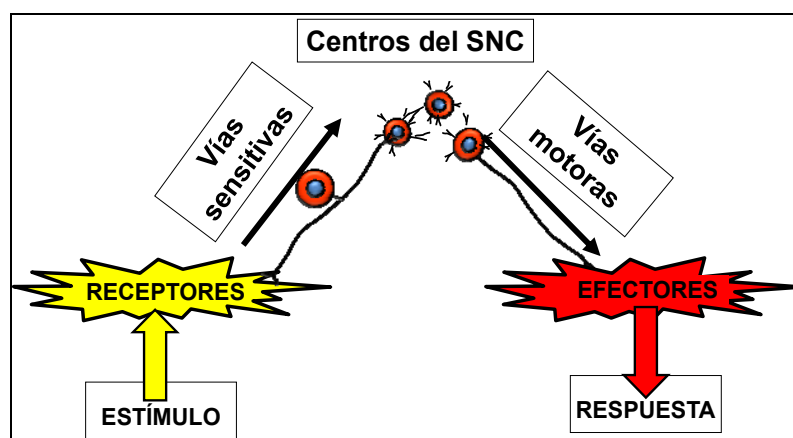


Figura 3.1: Organización funcional del organismo animal

## Algunas definiciones eléctricas

### Carga eléctrica

Cuando ciertas sustancias como el vidrio se frotan con una tela o con la piel, adquieren la capacidad de atraer objetos tales como trocitos de papel. Este fenómeno es una manifestación de una *fuerza eléctrica*, una de las principales fuerzas de la naturaleza. Dicha fuerza liga los electrones de un átomo y une los átomos de una molécula, determinando, por tanto, las propiedades químicas de las diferentes sustancias. Esta fuerza eléctrica es muy importante en las células, en las que influye, por ejemplo, en el transporte de iones a través de la membrana, estando relacionada también, como nombramos anteriormente, con la transmisión de los impulsos nerviosos y con la contracción de las fibras musculares. Es análoga a la fuerza de gravedad, pero mientras que la fuerza de gravedad entre dos objetos depende de su masa, en el caso de la fuerza eléctrica, la atracción depende de su *carga*. Existe, además, otra diferencia ya que las fuerzas gravitatorias son únicamente de atracción, mientras que las eléctricas pueden ser atractivas o repulsivas.

La *carga eléctrica* ( $q$ ) es una propiedad básica de las partículas elementales tales como los electrones y los protones, que conforman la materia. De hecho, aquello que mantiene la estructura del átomo como tal, es la fuerza eléctrica de atracción existente entre los protones y electrones del átomo, mientras que los protones entre ellos, ejercen fuerzas de repulsión. Aparecen así, dos clases de cargas eléctricas designadas como cargas positivas (+) y negativas (-). Estas fuerzas observadas entre protones y electrones conducen a enunciar que "*Dos cargas puntuales que presentan igual signo, se repelen y aquellas que presentan signo contrario, se atraen.*" (Fig. 3.2)

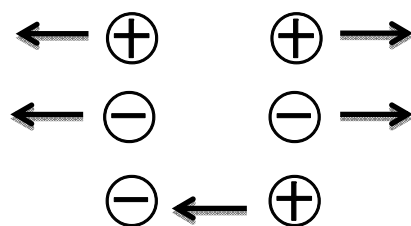


Figura 3.2: Esquema de las diferentes fuerzas de repulsión y atracción entre cargas eléctricas puntuales.

## Potencial eléctrico

Si se desea transportar una carga eléctrica de un lugar a otro, es necesario realizar un determinado trabajo o entregar una cierta cantidad de energía, definidos como *potencial eléctrico* (V). Cuanto mayor sea la distancia, mayor deberá ser la energía que se entregue o el trabajo que se deba realizar.

La diferencia de potencial entre dos puntos ( $\Delta V$ ) es igual a la energía que está asociada al desplazamiento de dicha carga eléctrica de un punto a otro.

La energía entregada está dada por la fórmula:

$$E = V \cdot q$$

Donde: E = cantidad de energía realizada [Joule]; V = cantidad de potencial eléctrico [Volt]; q = cantidad de carga desplazada [Coulomb].

Por pasaje de términos, el potencial eléctrico será:

$$V = \frac{E}{q}$$

$$\text{Volt} = \frac{J}{Cb}$$

### Unidades derivadas

mV (milivolt) =  $10^{-3}$  volt

$\mu$ V (microvolt) =  $10^{-6}$  volt

MG (megavolt) =  $10^6$  volt

KV (kilovolt) =  $10^3$  volt

## Conductores y Aisladores

Los cuerpos se dividen en *buenos* y *malos* conductores de la electricidad.

Los *buenos* conductores permiten el paso de las cargas eléctricas a través de ellos, mientras que los *malos* conductores, aisladores o dieléctricos, no lo permiten. Entre los primeros, encontramos por ejemplo el alambre de cobre que forma parte de los cables, un cuerpo húmedo, el citoplasma celular, los canales iónicos de la membrana celular; en tanto, entre los otros, están la goma, la madera, la bicapa lipídica de la membrana celular (Fig. 3.3).

También se pueden distinguir dos tipos de conductores:

Conductores de primer grado: son los conductores metálicos, en cuyo interior hay cargas libres que se mueven por la fuerza que ejerce sobre ellas un campo eléctrico. El transporte de la corriente eléctrica la realizan los electrones. No existe transporte de masa.

Conductores de segundo grado: son los electrolitos, cuyas cargas libres son iones (+) o (-), importantes biológicamente, constituidos por soluciones de distinta concentración de ácidos, hidróxidos, sales. El transporte lo realizan los iones quedando cargados positiva o negativamente. En estos casos, sí hay transporte de masa.

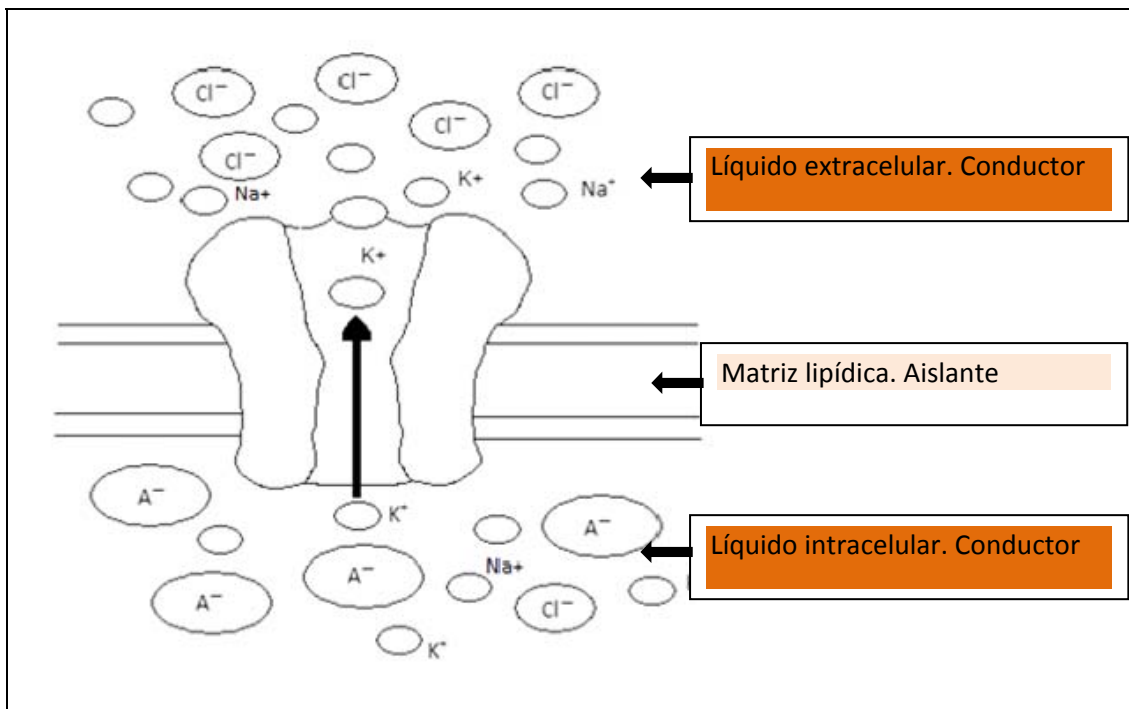


Figura 3.3: Esquema de la membrana celular, determinando buenos y malos conductores de la electricidad.

## Resistencia eléctrica. Ley de Ohm

En un conductor eléctrico, la relación entre la diferencia de potencial generada entre dos puntos ( $\Delta V$ ) y la intensidad de la corriente ( $I$ ) que lo atraviesa, constituye lo que se conoce como Resistencia ( $R$ ) de dicho conductor, según la Ley de Ohm.

$$R = \frac{\Delta V}{I}$$

$$\text{Ohm } (\Omega) = \frac{\text{Volt}}{\text{Ampère}}$$

Normalmente, todas las sustancias, tanto aislantes como conductores, ofrecen una mayor o menor oposición o resistencia, al paso de la corriente eléctrica, cuya unidad es el ohm ( $\Omega$ ).

En la membrana celular, la intensidad de corriente eléctrica transmitida es inversamente proporcional a la resistencia que ejerce el canal iónico, de acuerdo con esta Ley, expresada por Georg S. Ohm en 1826.

## Conductancia

La conductancia (G) está relacionada con la menor o mayor facilidad que ofrece un determinado material al paso de la corriente eléctrica, por consiguiente, sería lo opuesto a la Resistencia (R).

$$G = \frac{1}{R}$$

$$S = \frac{1}{\Omega}$$

La unidad de Conductancia se designa como Siemens (S), donde 1 S equivale a  $1/\Omega$  o  $\Omega^{-1}$ .

A nivel de la membrana celular, cuanto mayor sea la conductancia del canal iónico, mayor será la corriente eléctrica que circule bajo la acción de una diferencia de potencial dada.

## Gradiente electroquímico a nivel de la membrana. Potencial de membrana

En todas las células vivas, la membrana celular separa dos compartimientos con una inequidad en la distribución de iones a ambos lados, apareciendo siempre un exceso de cationes en el líquido extracelular (gradiente químico y eléctrico y por consiguiente electroquímico). Dentro de los iones que se encuentran en mayor cantidad en el líquido intersticial, encontramos  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{HCO}_3^-$ , mientras que en el líquido intracelular predominan  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{PO}_4\text{H}^-$  y aniones no difusibles, generalmente proteicos. Esto genera una diferencia de potencial eléctrico entre ambas caras de la membrana celular, conocido como



*potencial de membrana*. Las diferencias eléctricas e iónicas condicionan la diferencia de potencial y no se equilibran por más que penetren más cationes a la célula o salgan al exterior.

Si quisiéramos medir este potencial, bastaría con insertar en el citoplasma celular un microelectrodo de vidrio lleno de una solución electrolítica, conectado a un osciloscopio y otro electrodo sumergido en el líquido extracelular. Convencionalmente, se considera el potencial extracelular igual a cero. En las diferentes células se observará que el valor del *potencial de membrana en reposo* oscila entre -60 y -90 mV; el signo negativo indica que el interior celular es más negativo con respecto al exterior (Fig. 3.4). Sin embargo, si colocáramos ambos microelectrodos en el líquido extracelular o en el citoplasma, veríamos que no se registra diferencia de potencial, ya que separadamente, ambos se comportan como eléctricamente neutros.

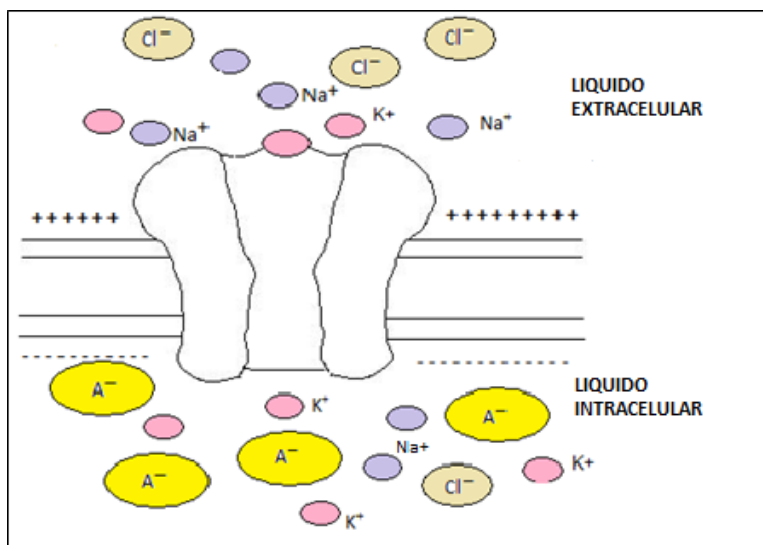


Figura 3.4: Esquema de la diferencia de potencial de membrana entre el exterior e interior de la membrana celular.

### Potencial de membrana en reposo: Su origen y medición. Ecuación de Goldman-Hodgkin y Katz

El término de potencial de membrana en reposo ( $E$  o  $V_r$ ), hace referencia al potencial eléctrico generado en la célula, cuando ésta no sufre ningún tipo de perturbación. Es aquél potencial en estado estacionario de la célula, en el que no se produce un flujo neto de cargas a través de la membrana; estando determinado, por tanto, por las diferentes concentraciones

iónicas existentes a ambos lados de la membrana y por las permeabilidades que cada ion presenta para esa membrana.

La desigual distribución de los iones se mantiene principalmente, debido a: a) la presencia en la membrana, de la bomba de  $\text{Na}^+ - \text{K}^+$ , que cotransporta  $\text{Na}^+$  hacia fuera y  $\text{K}^+$  hacia dentro, en diferentes cantidades, gracias a la hidrólisis de ATP (intercambia 3  $\text{Na}^+$  por 2  $\text{K}^+$ ); b) la presencia en el interior celular, de aniones no difusibles (sulfatos, fosfatos orgánicos y proteinatos), que en el caso especial de las proteínas, debido a su tamaño, no logran atravesar la membrana y a c) la mayor permeabilidad que la membrana presenta al potasio, con respecto al sodio, la que es generalmente unas 100 veces superior. Estos tres factores hacen posible la generación y mantenimiento del potencial de membrana en reposo.

Este potencial puede ser estimado en base a la Ecuación desarrollada por Goldman-Hodgkin y Katz, que se presenta a continuación:

$$E = \frac{R \cdot T}{F} \cdot \text{Ln} \frac{P_{K^+}[K^+]_e + P_{Na^+}[Na^+]_e + P_{Cl^-}[Cl^-]_i}{P_{K^+}[K^+]_i + P_{Na^+}[Na^+]_i + P_{Cl^-}[Cl^-]_e}$$

Donde: E = potencial de membrana en reposo; R= 8,31 Joule/K mol (constante de los gases), (recordemos que 1 Joule = 1 Volt . cb); T = temperatura en K; F = 96500 cb (constante de Faraday); i = concentración interna o intracelular; e = concentración externa o extracelular; P = coeficiente de permeabilidad de cada ion.

El hecho de considerar únicamente estos iones ( $\text{K}^+$ ;  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$ ) se debe a que, en la práctica, son los únicos electrolitos que tienen concentración suficiente y coeficientes de permeabilidad importantes como para tener influencia en el valor del potencial de membrana en reposo. Como la movilidad real de un ion, no es posible determinarla, se la reemplaza por este coeficiente de permeabilidad (P) que tiene en cuenta el coeficiente de partición de dicho ion y el espesor de la membrana. Este concepto tiene en cuenta, por consiguiente, las características particulares de la membrana, con respecto a la mayor o menor capacidad que presentará para que el ion, la atraviese.

Básicamente, la ecuación de Goldman-Hodgkin y Katz nos dice que cuanto mayor sea la concentración de un tipo de ion y la permeabilidad de la membrana hacia él, mayor será su papel en la determinación del potencial de membrana. A su vez, si la diferencia de potencial depende del flujo y éste, además, del gradiente de concentración, es lógico que para mantener la diferencia de potencial será necesario mantener dicho gradiente.

## Potencial de equilibrio de un ion. Ecuación de Nernst

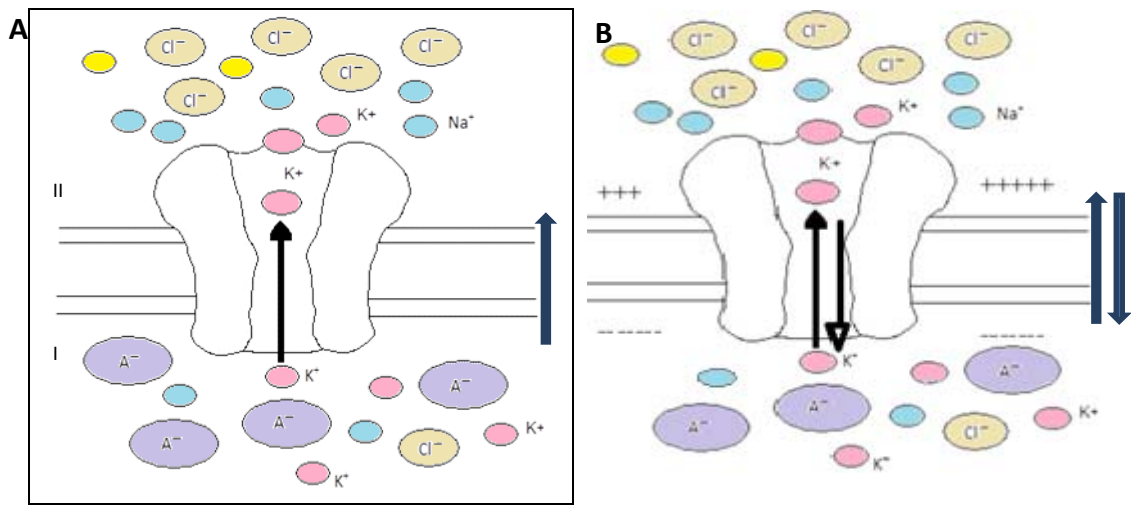


Figura 3.5: Potencial de equilibrio de un ion.

Para lograr entender cómo se genera el potencial de equilibrio de un determinado ion, tengamos en cuenta lo que se observa en la Figura 3.5. En A, se observa una membrana hipotética que es sólo permeable al  $K^+$ , el cual tenderá a difundir del compartimento I hacia el II siguiendo el gradiente de concentración. Al difundir cada vez más potasio, se genera un aumento de cargas positivas en el compartimento II, que se observa en B y por tanto un aumento de cargas negativas en el compartimento I. Estas cargas, positivas y negativas, debido a la fuerza de atracción entre cargas de sentido opuesto, se depositan a ambos lados de la membrana, produciéndose así una diferencia de potencial que puede llegar a ser determinada al colocar dos electrodos y medirla con un voltímetro.

En este momento, se generan dos fuerzas opuestas que actúan sobre el potasio: una fuerza química que favorece el flujo de este ion del compartimento I hacia el II (debido a su gradiente

químico) y una fuerza eléctrica que favorece el pasaje de  $K^+$  del compartimento II hacia el I (debido al gradiente eléctrico de potencial). Llegado un cierto tiempo, estas fuerzas opuestas equilibran sus acciones y se balancean, resultando en que no haya más pasaje de este ion, con flujo neto igual 0. Es allí cuando se dice que *el ion se encuentra en equilibrio pasivo* y el potencial de membrana generado corresponde al *potencial de equilibrio de dicho ion*. En este caso, al medirlo con un voltímetro, su valor será de -75mv (potencial de equilibrio del  $K^+$ ).

Por tanto, se define al potencial de equilibrio de un ion, como al valor de potencial de membrana en el cual no existe flujo neto de dicho ion, pudiendo ser éste, calculado en cualquier célula y dependiente, únicamente de la relación de concentraciones de este ion a ambos lados de la membrana. La forma de calcularse es a partir de la llamada Ecuación de Nernst, que se expresa de la siguiente manera:

$$E = \frac{R \cdot T}{z \cdot F} \cdot \ln \frac{C_e}{C_i}$$

Donde: E= potencial de equilibrio; R = constante de los gases (como ya vimos en la Ecuación anterior, tiene un valor de 8,31 Joule/K mol); T = temperatura absoluta en K a la que sucede la reacción (en el cuerpo animal, generalmente 310 K); z = carga del ion (+1 para el caso del  $K^+$ , +1 para el  $Na^+$ , -1 para el  $Cl^-$ ); F = constante de Faraday (96500 cb/mol);  $C_e$  y  $C_i$  = Concentraciones extra e intracelular del ion.

Tanto R como F son constantes, por lo cual el valor de R.T/F sólo dependerá de la temperatura, que generalmente en el interior del cuerpo animal es de 310 K (37°C); además si queremos pasar de Ln a Log multiplicamos por el factor 2,303, quedando redondeado en un valor de 60 mV, por lo cual podemos decir que la ecuación quedará:

$$E = 60 \text{ mV} \cdot \text{Log} \frac{C_e}{C_i}$$

En la Tabla siguiente (Tabla 3.1) se presentan algunos valores de concentraciones intra y extracelulares de los principales iones y sus valores calculados de potencial de Equilibrio de cada uno de ellos según la Ecuación de Nernst, en un axón gigante de calamar (considerando una temperatura de 20°C).

**Tabla 3.1: Concentraciones iónicas intra y extracelulares y potencial de equilibrio de Nernst en un axón gigante de calamar.**

iones	Concentración en LIC (mM)	Concentración en LEC (mM)	Potencial de Equilibrio (mV)
K <sup>+</sup>	400	20	-75
Na <sup>+</sup>	50	440	+55
Cl <sup>-</sup>	52	560	-60

### Tejidos excitables del organismo. Potencial de acción

Los tejidos nervioso y muscular, son ejemplos típicos de los llamados *tejidos excitables del organismo*, ya que en ellos el potencial de membrana experimenta variaciones periódicas, cíclicas y rápidas como respuesta a algún estímulo, que produce la excitación eléctrica celular. Es así, que ese potencial que estaba en reposo con un valor cercano a los -70 o -80mV, varía experimentando la aparición de un cambio en la conductancia para alguno de los iones involucrados en el potencial de membrana como son el Na<sup>+</sup>, el K<sup>+</sup> o el Ca<sup>+2</sup>, siendo esta variación de la permeabilidad debida a la apertura de canales activados por un ligando o mensajero químico como es la acetilcolina, o activados por voltaje debido a un estímulo eléctrico. Definimos así al *potencial de acción*, como un cambio rápido y transitorio en el potencial de membrana en respuesta a un estímulo de intensidad adecuada (por encima del umbral) que se propaga rápidamente por la membrana celular. Dicho potencial de acción, consta de dos etapas o fases principales: despolarización y repolarización. Cada potencial de acción comienza con un cambio rápido y transitorio desde el potencial de membrana negativo en reposo hasta un potencial positivo (*despolarización*) y termina con un potencial que se vuelve a negativizar casi igual de rápido (*repolarización*).

Cuando la célula es excitada ante la llegada de un impulso, se produce un cambio en la polaridad de la membrana por la apertura en forma explosiva de gran cantidad de los canales de Na<sup>+</sup> activados por voltaje, lo que permite que estos iones con carga positiva difundan hacia el interior, por ejemplo a nivel del axón nervioso (*etapa de despolarización*) (Fig. 3.6). Es así, que el potencial de membrana que era cercano a -70mV durante el reposo, aumenta rápidamente hacia la positividad, alcanzando valores de hasta +30mV. Cuando llega a este

valor, cercano al del potencial de equilibrio para el ion sodio, los canales voltaje dependientes para el  $\text{Na}^+$  se inactivan y se cierran. En ese momento, se produce la apertura de mayor cantidad de canales voltaje dependientes para el  $\text{K}^+$ , alcanzando la membrana su mayor permeabilidad para este ion. De esta manera, la rápida difusión de potasio hacia el exterior reestablece el valor negativo normal del potencial de membrana, produciéndose la *etapa de repolarización* (Fig. 3.7). Al llegar nuevamente al valor del potencial de membrana en reposo, puede producirse que los canales voltaje dependientes para el  $\text{K}^+$ , permanezcan aún abiertos, continuando el flujo de mayor cantidad de dichos iones, produciéndose la *etapa de hiperpolarización*, hasta alcanzar un valor de potencial de membrana cercano al potencial de equilibrio para el  $\text{K}^+$ . Es en este momento que dichos canales se inactivan y se cierran alcanzándose el valor del potencial de membrana en reposo.

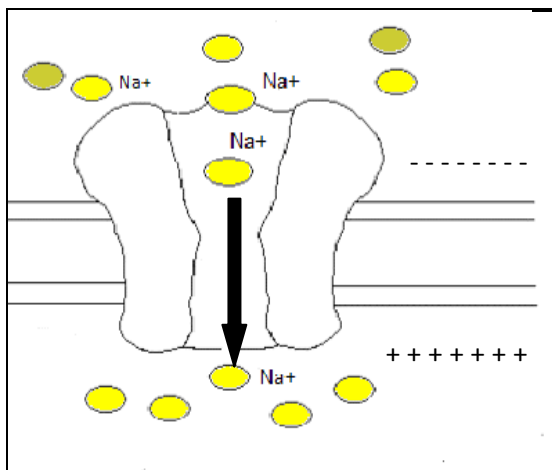


Figura 3.6: Etapa de despolarización de la membrana.

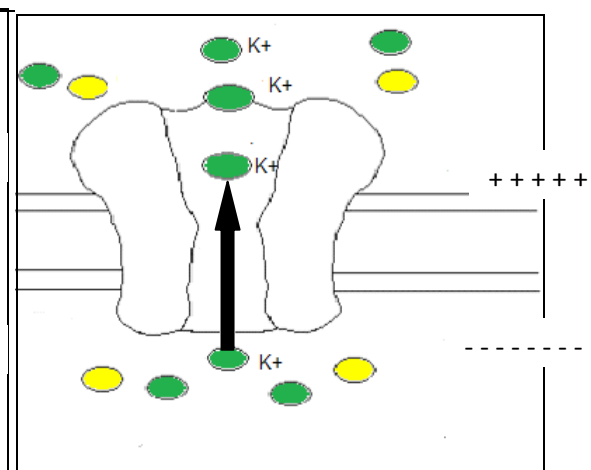


Figura 3.7: Etapa de repolarización de la membrana.

La respuesta celular a un estímulo umbral es siempre la misma en función de la llamada *Ley del Todo o Nada*, que establece que la célula responderá con un potencial de acción

exactamente igual en valores de tiempo y de diferencia de potencial frente a cualquier tipo de estímulo umbral o superior pero que ante un estímulo inferior al umbral no se originará dicho potencial de acción.

Las neuronas son células que se especializan en recibir y propagar la información en forma de impulsos nerviosos. En ella se distinguen tres regiones principales (Fig. 3.8): el cuerpo celular o soma que presenta prolongaciones llamadas dendritas, las que desempeñan un papel principal en la excitación y recepción del impulso; el axón que actúa como la unidad conductora del mismo, pudiendo estar o no recubierto por una vaina de mielina y el botón terminal o terminal axónico que constituye el elemento de transmisión sináptica de la información.

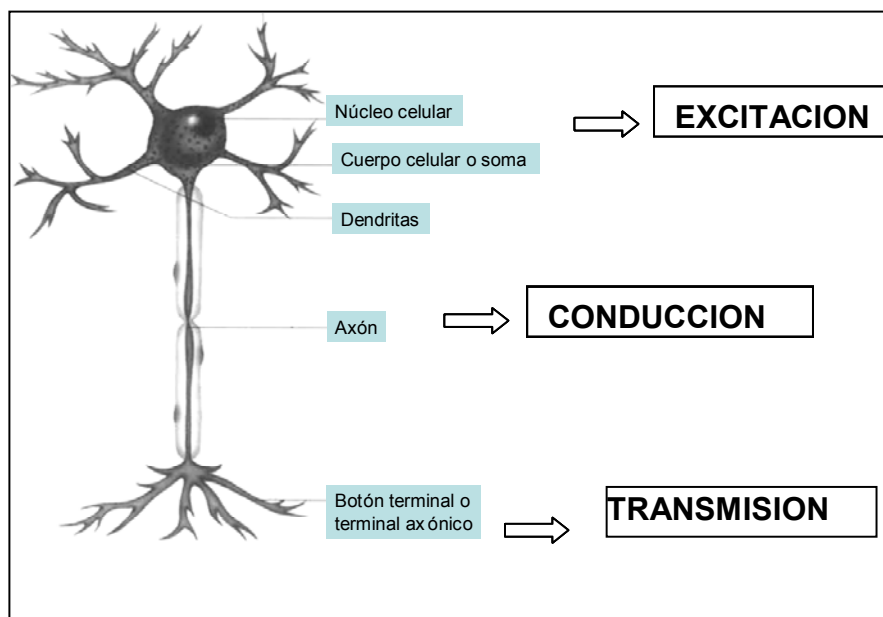


Figura 3.8: Estructura típica de una célula neuronal

Como dijimos anteriormente, cuando un estímulo supera un determinado umbral, la neurona se excita y cambia su polaridad a nivel de su membrana, produciéndose el potencial de acción. Es importante destacar que el que el número de iones que se desplazan a través de la pared celular durante las etapas de despolarización y repolarización es muy pequeño en relación a la cantidad total de iones que hay dentro de la célula. Por lo tanto, un solo potencial de acción no producirá un cambio importante en la concentración de iones a nivel celular. La célula podrá, por tanto, excitarse miles de veces antes de que la concentración de  $\text{Na}^+$  o  $\text{K}^+$  se vea afectada.

El potencial de acción generado en un punto de la membrana se transmite rápidamente en todas direcciones, ya que la despolarización de una zona causa la apertura de los canales vecinos y como la neurona es una estructura fibrilar, la despolarización se propagará a lo largo de toda la fibra, hasta que se haya despolarizado toda la membrana.

El potencial de acción consta de un periodo en el cual por más que llegue un nuevo estímulo no se producirán cambios en la célula, este momento corresponde a la despolarización y durante el inicio de la repolarización y se denomina *Periodo refractario absoluto* y sirve para que el impulso se transmita en una sola dirección. Pero luego de dicho inicio y durante la repolarización puede producirse que la aplicación de un nuevo estímulo pueda producir, sin necesidad de llegar al reposo, un nuevo potencial de acción; para que esto ocurra, dicho estímulo deberá tener una intensidad mayor que la del estímulo inicial, este periodo se llama *Periodo refractario relativo*.

El axón neuronal tiene por función la conducción del impulso. Si el axón está recubierto de mielina, esta sustancia actuará como un aislante eléctrico impidiendo el pasaje del impulso. Pero naturalmente, el recubrimiento no es total, ya que existen ciertas zonas de constricciones de la vaina conocidas con el nombre Nodos o nódulos de Ranvier, a través de los cuales se producirá la propagación del potencial. En este caso dicha conducción será de tipo saltatoria, ya que irá de nodo en nodo y por tanto tendrá una mayor velocidad (Fig. 3.9). En el caso en que el axón no esté cubierto de mielina cada potencial de acción actuará como estímulo para la siguiente porción de la membrana, produciéndose la conducción por contigüidad y teniendo una menor velocidad que en el caso anterior (Fig. 3.10).

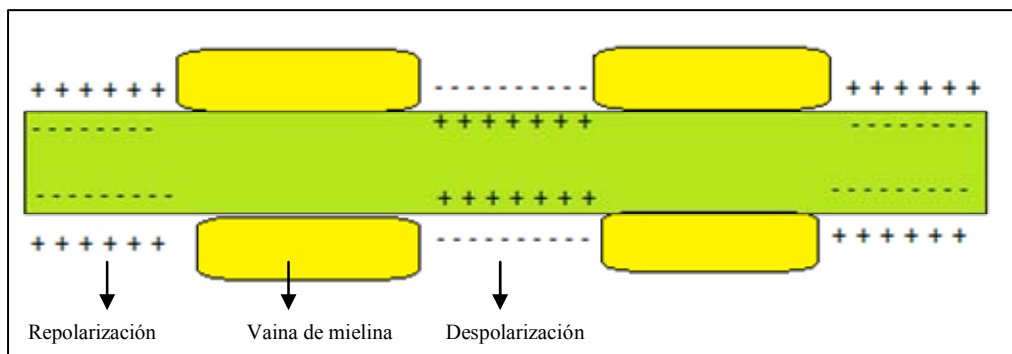


Figura 3.9: Propagación del impulso en un axón miélinico.



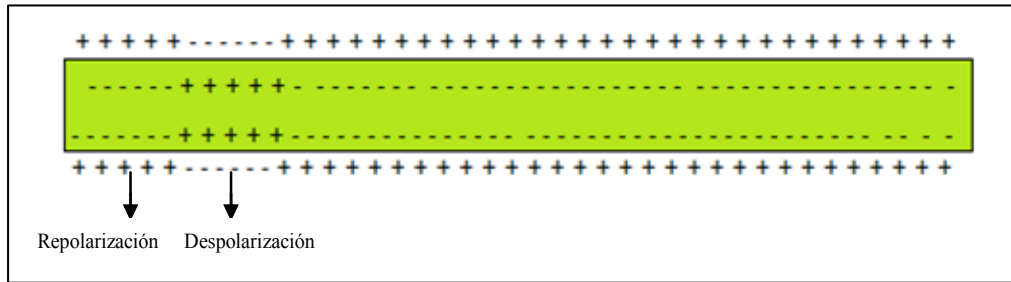


Figura 3.10: Propagación del impulso en un axón amielínico.

La transmisión del impulso nervioso se realiza por medio del proceso conocido como *sinapsis*. Mediante este proceso, las células del sistema nervioso se conectan entre sí o con otro tipo de células (musculares). Estas conexiones pueden realizarse a partir de dos tipos de sinapsis: eléctricas o químicas (Fig. 3.11). En las primeras, que ocurren en menor cantidad, las dos células neuronales se encuentran en contacto directo; así los canales iónicos de las membranas presinápticas y postsinápticas están juntos y las zonas de contacto se denominan uniones tipo hendidura o tipo gap. Este tipo de uniones en las células excitables permite que la transmisión del impulso sea con rapidez y sincronización, como si formaran un verdadero sincitio eléctrico. En las sinapsis químicas, existe una separación física o espacio intersináptico entre las dos células en donde es vertido el neurotransmisor (catecolamina, acetilcolina, GABA, histamina, etc.), que es la sustancia o mediador químico que transmitirá la información. Los neurotransmisores se liberan a partir de botones terminales existentes en la membrana presináptica difundiendo hacia el espacio o hendidura intersináptica y a partir de allí interaccionan con proteínas específicas, los receptores postsinápticos, existentes en la membrana postsináptica, produciendo su despolarización o hiperpolarización, dependiendo del tipo de neurotransmisor secretado, provocando así, una respuesta de tipo excitatoria o inhibitoria, respectivamente.

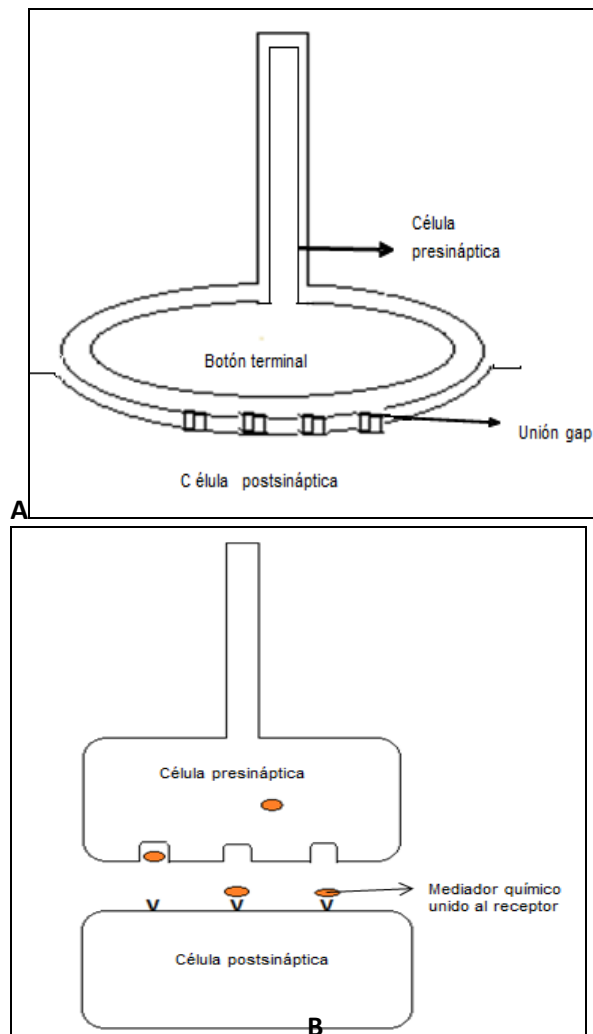


Figura 3.11: A) Sinapsis eléctrica. B) Sinapsis química.

## Potenciales Eléctricos del Corazón

### Introducción

El corazón es el órgano principal del aparato circulatorio. Está formado por 4 cavidades, dos aurículas (izquierda y derecha) y dos ventrículos (izquierdo y derecho). Asimismo, estructuralmente presenta una capa interna denominada endocardio, la cual recubre las cavidades 4 cavidades. Inmediatamente después se encuentra el miocardio, que constituye el músculo cardíaco propiamente dicho. A este último le sigue la capa más externa denominada epicardio y, finalmente, el corazón se encuentra limitado por el pericardio, que lo protege y separa del resto de los órganos.

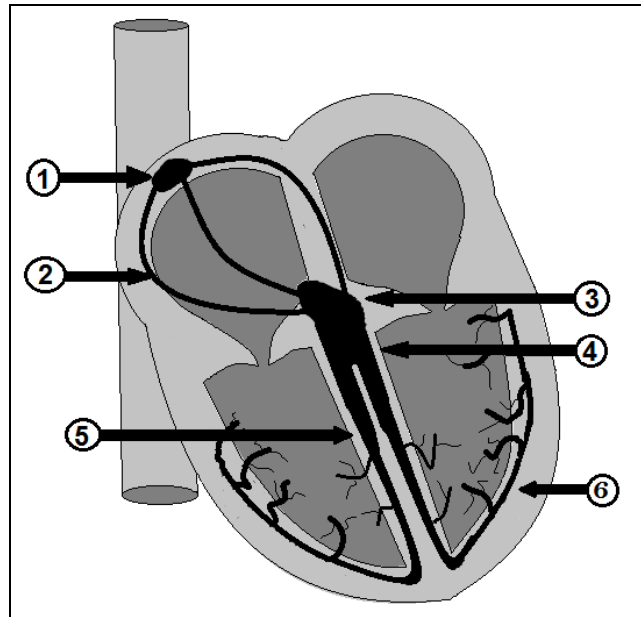
El corazón está compuesto por tres tipos de músculo cardíaco: miocardio auricular, miocardio ventricular y las fibras musculares excitadoras o también llamadas, fibras conductoras especializadas (marcapasos). A pesar de que en estas últimas la capacidad de contracción es débil ya que carecen de fibras contráctiles, su importancia se basa en la propiedad que tienen de generar potenciales de acción, haciendo del corazón un órgano autónomo, es decir, que puede contraerse en ausencia de un estímulo nervioso. Por su parte, tanto el músculo auricular como el ventricular están formados por fibras musculares de trabajo (contráctiles), capaces de contraerse en respuesta al potencial de acción generado por las fibras musculares excitadoras.

### **Potenciales eléctricos en el músculo cardíaco**

El potencial de membrana en reposo de las fibras cardíacas en el miocardio auricular y ventricular es de aproximadamente  $-90$  mV. Como todo tejido excitable, este potencial no se modifica si el tejido no es estimulado. Una característica importante del miocardio es que la contracción se regirá bajo la *Ley del Todo o Nada*, ya explicada anteriormente, es decir, que ante la llegada de un estímulo la contracción sucederá completamente o no se dará si el estímulo no alcanza el umbral.

El potencial de acción es el mecanismo básico que utiliza el miocardio para transmitir el impulso eléctrico. Al producirse un potencial de acción, el potencial de membrana en reposo que se encontraba próximo a los  $-90$  mV se eleva hasta un valor positivo de  $+20$  mV, aproximadamente.

A nivel cardíaco, el impulso eléctrico se genera en el nódulo sinusal también llamado sinoauricular (S-A) o nódulo S-A, que se encuentra ubicado en la pared súpero lateral posterior de la aurícula derecha. Este nódulo tiene la capacidad de autoexcitarse, actuando como el marcapasos cardíaco. Posteriormente el impulso se propaga al miocardio auricular y de este a través de las vías internodulares llega al nódulo auriculoventricular (A-V). Este último está ubicado en la pared posterior de la aurícula derecha. Aquí el impulso procedente de las aurículas sufre un pequeño retraso, para luego propagarse por medio del haz de Hiss, de sus ramas y por las fibras de Purkinje, hacia todo el miocardio ventricular (Fig. 3.12).



*Figura 3.12: Representación del sistema de conducción eléctrica del corazón. 1, nódulo sinuauricular; 2, vías internodulares; 3, nódulo auriculoventricular; 4, haz de His; 5, ramas derecha e izquierda del haz; 6, fibras de Purkinje.*

A nivel celular, en las fibras miocárdicas, durante la llegada del potencial de acción se produce la activación de los siguientes canales iónicos dependientes de voltaje o voltaje sensibles:

- Canales rápidos de sodio ( $\text{Na}^+$ ).
- Canales lentos de calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ).
- Canales lentos de  $\text{Na}^+$ .
- Canales de potasio ( $\text{K}^+$ ) sensibles al voltaje.

Estos canales se activarán a distintas velocidades y tiempos, permitiendo el ingreso de cargas eléctricas positivas al interior celular, generando consigo la liberación de calcio desde los túbulos sarcoplasmáticos y, finalmente, la contracción de las fibras miocárdicas.

Para poder comprender esto, veremos cómo se produce el potencial de acción en las fibras miocárdicas ventriculares. En la Figura 3.13 podemos ver 5 fases, indicadas con los números de 0 a 4, durante las cuales se producen los siguientes acontecimientos:

- Fase 0: Apertura de canales rápidos de  $\text{Na}^+$ . Se produce el ingreso masivo de iones  $\text{Na}^+$  al interior celular.
- Fase 1: Se cierran los canales rápidos de  $\text{Na}^+$  y se abren los canales de  $\text{K}^+$ , lo que genera una repolarización parcial al salir cargas netas positivas hacia el exterior celular.

- Fase 2: “Fase de Meseta”. Comienzan a abrirse los canales lentos de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Ca}^{+2}$ , que permiten el ingreso de estos iones al interior celular, mientras que los canales de  $\text{K}^+$  continúan abiertos. Esto produce la fase de meseta característica.
- Fase 3: Se cierran los canales lentos de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Ca}^{+2}$ , los canales de  $\text{K}^+$  continúan abiertos, lo que precipita la repolarización.
- Fase 4. Se activa la bomba de  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  ATPasa y se recupera el potencial de membrana en reposo.

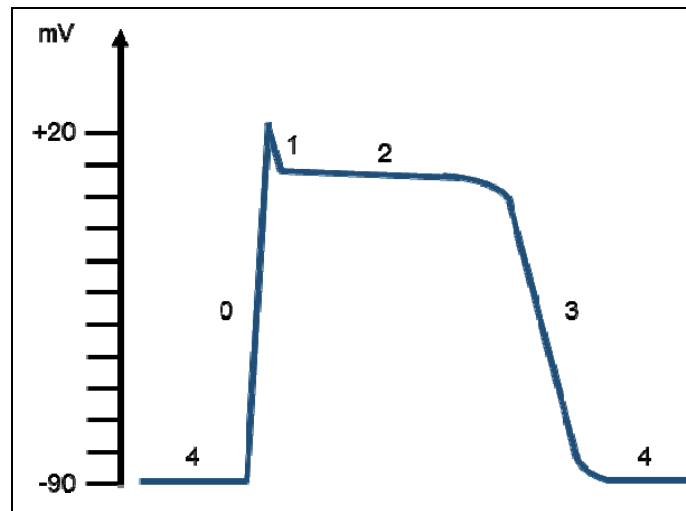


Figura 3.13: Representación gráfica del potencial de acción en las células miocárdicas ventriculares expresado en milivoltios (mV). Descripción detallada en el texto.

## Bases Físicas del Electrocardiograma

### Introducción

El electrocardiograma (ECG) consiste en el registro gráfico de la actividad eléctrica del corazón. Esto es posible gracias a que los potenciales eléctricos generados por el corazón se distribuyen en el organismo hasta llegar a la superficie corporal. Al colocar los electrodos del electrocardiógrafo en determinados puntos de la superficie corporal, denominados derivaciones, se pueden registrar los potenciales eléctricos.

El electrocardiógrafo es el aparato eléctrico que registra los potenciales eléctricos generados por el corazón. La ubicación de los electrodos sobre la superficie corporal determina la formación de un triángulo, conocido como “Triángulo de Einthoven”.

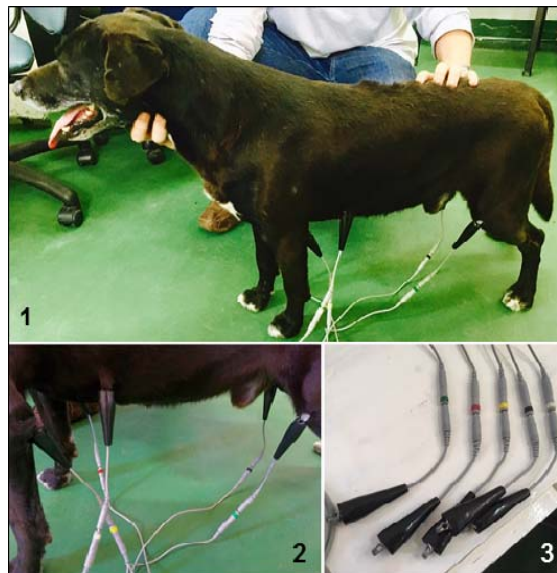
## Consideraciones generales para realizar un electrocardiograma

Para realizar el ECG el animal debe estar tranquilo, evitando cualquier factor estresante. Por ello, es ideal un ambiente tranquilo, con poca luz y libre de ruidos. La posición de preferencia en los animales domésticos es decúbito lateral derecho, ya que ha sido estandarizada internacionalmente. En ocasiones donde dicha posición pueda representar un riesgo para el animal, el ECG puede realizarse en estación o incluso en decúbito esternal.

En el canino doméstico suelen emplearse 4 electrodos también llamados “cocodrilos” por su aspecto dentado. Los mismos se identifican con diferentes colores y se colocan en la piel de la siguiente manera:

- Electrodo rojo: Miembro anterior derecho, a la altura del codo.
- Electrodo negro: Miembro posterior derecho, a la altura de la rodilla.
- Electrodo verde: Miembro posterior izquierdo, también a la altura de la rodilla.
- Electrodo amarillo: Miembro anterior izquierdo, a la altura del codo.

En algunas situaciones suele colocarse un quinto electrodo para evaluar las derivaciones precordiales. Estas derivaciones son menos utilizadas en la medicina veterinaria. Su ubicación más frecuente es en el 6to espacio intercostal a la altura del corazón, por encima de la punta del ventrículo izquierdo (Imagen 3.1).



*Imagen 3.1: 1y 2) Ubicación de los electrodos en un canino macho en estación. 3) Identificación de los electrodos por color.*

## Electrocardiograma normal

El ECG en condiciones fisiológicas normales está formado por una onda P, un complejo QRS y una onda T (Fig. 3.14).

La onda P representa la despolarización de las aurículas, que sucede antes de la contracción auricular. Corresponde al potencial de acción generado en el nódulo sinoauricular que difunde por las vías internodulares hacia el nódulo auriculoventricular.

El complejo QRS representa la despolarización de los ventrículos, que sucede antes de la contracción ventricular. En este caso, se activan las fibras musculares de los ventrículos. La onda de despolarización que se va extendiendo por ambos ventrículos de la siguiente forma:

- Onda Q, representa la despolarización del septum interventricular, pared que divide los dos ventrículos.
- Onda R, representa la despolarización de la punta del ventrículo izquierdo.
- Onda S, representa la despolarización de la base del ventrículo izquierdo.

La onda T representa la repolarización de los ventrículos, es decir, cuando los ventrículos se recuperan de su estado de despolarización.

El segmento P-R es el espacio comprendido entre el final de la onda P y el inicio del complejo QRS. Durante este periodo finaliza la despolarización de las aurículas y se inicia la activación del nódulo A-V.

El segmento S-T corresponde a la fase lenta de la despolarización de los ventrículos. Básicamente se inicia al terminar el complejo QRS y finaliza al iniciar la onda T.

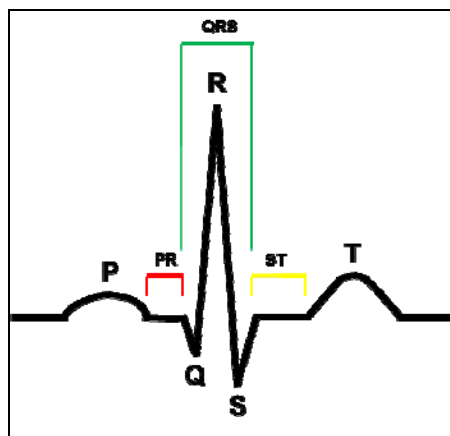


Figura 3.14: Representación gráfica de un electrocardiograma normal. Onda P; Complejo QRS; Onda T; Segmento PR; Segmento ST.

## Referencias

- Castellote S. B. (1995) Fisiología del nervio. En: A. García Sacristán. *Fisiología Veterinaria (1ra edición)* (pp. 11-40). Madrid, España: McGraw-Hill Interamericana Editores S.A. de C.V.
- Cisale H. (2011). Membrana celular y transporte. En: H. Cisale. *Física Biológica Veterinaria. (2º edición)* (pp. 89-112). Buenos Aires: Editorial Eudeba.
- Frumento A.S (1995). Bases electrofisiológicas. En A.S Frumento Biofísica (3ra Edición), *Bases biofísicas de la electrocardiografía* (pp. 209-231). Madrid, España: Mosby-Doyma Libros.
- Guyton AC, Hall JE (2001). Músculo cardíaco, el corazón como bomba. En C. A. Guyton y J. E. Hall (Eds.), *Tratado de fisiología médica (10ma edición)* (pp. 115-127). México: McGraw-Hill Interamericana Editores S.A. de C.V.
- Guyton AC, Hall JE (2001). Estimulación rítmica del corazón. En C. A. Guyton y J. E. Hall (Eds.), *Tratado de fisiología médica (10ma edición)* (pp. 129-136). México: McGraw-Hill Interamericana Editores S.A. de C.V.
- Guyton AC, Hall JE (2001). Electrocardiograma normal. En C. A. Guyton y J. E. Hall (Eds.), *Tratado de fisiología médica (10ma edición)* (pp. 137-143). México: McGraw-Hill Interamericana Editores S.A. de C.V.
- Parisi M (2001). Biofísica cardíaca y respiratoria, de la atmósfera y del mar. En M. Parisi. *Temas de Biofísica* (pp. 197-205). Santiago, Chile: McGraw-Hill Interamericana de Chile LTDA.



# CAPÍTULO 4

## Biofísica del equilibrio ácido-base del organismo animal

*Daniela Olivera, Pablo de la Sota*

Se ha mencionado en el Capítulo 2 que los procesos biológicos se llevan a cabo en un medio acuoso, ahondándose en las distintas características de dichas soluciones. En el presente capítulo se estudiará particularmente el comportamiento cuando el soluto es un ácido o una base.

### Propiedades electrolíticas

Todas las sustancias (solutos) que se disuelven en agua se pueden agrupar en dos categorías: electrolitos y no electrolitos.

**Electrolitos:** son sustancias que, cuando se disuelven en agua, forman una solución que conduce la electricidad.

**No electrolitos:** son sustancias que por el contrario, no conducen la corriente eléctrica cuando se disuelven en agua.

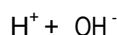
Asimismo, los electrolitos se pueden clasificar según su grado de disociación en fuertes y débiles. Los fuertes corresponden a los que se disocian totalmente y los débiles, a los que la disociación es parcial, entendiéndose por disociación a la separación del compuesto en cationes y aniones.

En la Tabla 4.1 se presentan distintos solutos presentes en el organismo animal, que ejemplifican las definiciones mencionadas anteriormente.

**Tabla 4.1: Clasificación de solutos en solución acuosa**

<b>Electrolitos Fuertes</b>	<b>Electrolitos Débiles</b>	<b>No electrolitos</b>
<i>ClNa</i>	<i>CH<sub>3</sub>COOH</i>	<i>Glucosa</i>
<i>ClK</i>	<i>NH<sub>4</sub>OH</i>	<i>Sacarosa</i>
<i>NaOH</i>	<i>HCN</i>	<i>Urea</i>
<i>Cl<sub>2</sub>Ca</i>	<i>H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></i>	<i>Glicerol</i>

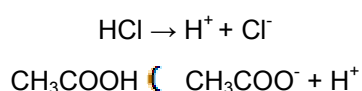
Debemos hacer una mención especial para el agua, el cual es un electrolito muy débil, y por lo tanto, un mal conductor de la electricidad ya que experimenta una ligera disociación:



### Ácidos y bases: definición y propiedades

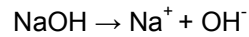
Entre los iones presentes en el plasma que hemos mencionado en el Capítulo 2, hay uno de fundamental importancia, el ion hidrógeno o protón. La concentración de esta partícula es fundamental en el equilibrio ácido-base del organismo.

Un *ácido* es una sustancia capaz de ceder protones [H<sup>+</sup>] al medio, como es el caso del ácido clorhídrico (HCl) y el ácido acético (CH<sub>3</sub>COOH). Ambas sustancias al disociarse liberan protones mediante la siguiente reacción:

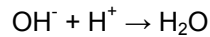


El primer ejemplo, el ácido clorhídrico, es un ácido fuerte, es decir, se disocia completamente, esto significa que todas las moléculas presentes del ácido en la solución se separan en sus iones Cl<sup>-</sup> e H<sup>+</sup>. El segundo ejemplo, el ácido acético, es un ácido débil, se disocia parcialmente, con lo cual en una solución de ácido acético tendremos iones CH<sub>3</sub>COO<sup>-</sup>, H<sup>+</sup> y moléculas del ácido sin disociar, en equilibrio.

Por otro lado, una *base* es una sustancia que capta [H<sup>+</sup>] del medio, como por ejemplo el hidróxido de sodio (NaOH) y el hidróxido de amonio (NH<sub>4</sub>OH).



La especie  $\text{OH}^-$  es un aceptor de protones ya que rápidamente reacciona verificando la definición:



Análogamente a lo mencionado para ácidos, las bases se pueden clasificar según su grado de disociación en fuertes y débiles, el hidróxido de sodio es un ejemplo de las primeras ya que en solución, sólo vamos a encontrar iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{OH}^-$ ; en cambio, el hidróxido de amonio es una base débil, porque en solución coexistirán iones  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{OH}^-$  con moléculas  $\text{NH}_4\text{OH}$  en equilibrio.

Por último, se llama *anfóteros o anfólitos* a las sustancias que actúan como ácidos o como bases según la concentración de protones del medio en que se encuentren. Los aminoácidos son ejemplos de anfólitos; el grupo carboxilo de éstos es un ácido, es decir, donador de protones y el grupo amino es una base, debido a que acepta protones.

## Ley de acción de las masas o de Guldberg y Waage. Producto iónico del agua

La velocidad de una reacción química es proporcional al producto de las concentraciones molares de las sustancias reaccionantes, cada una elevada a una potencia igual al número de moléculas que aparecen en la ecuación equilibrada, por lo tanto si tenemos la siguiente reacción:



Donde A y B son los reactivos, C y D los productos de la reacción, y a, b, c y d los coeficientes estequiométricos de la reacción.

Las velocidades de la reacción se expresan como:

$$v_1 = k_1[A]^a[B]^b$$

$$v_2 = k_2[C]^c[D]^d$$

En el equilibrio, las velocidades de reacción son iguales, por lo tanto de  $v_1 = v_2$  surgiendo:

$$k_1[A]^a[B]^b = k_2[C]^c[D]^d$$

Reacomodando ambos miembros:

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{[C]^c[D]^d}{[A]^a[B]^b}$$

Donde el cociente  $\frac{k_1}{k_2}$  representa la constante de equilibrio de la reacción, K, dependiente de la temperatura, quedando expresado como:

$$K = \frac{[C]^c[D]^d}{[A]^a[B]^b}$$

Si aplicamos esta ecuación al caso particular de la disociación del agua obtenemos:

$$K_{H_2O} = \frac{[H^+][OH^-]}{[H_2O]} \quad H^+ + OH^-$$

Luego:

$$\underbrace{K_{H_2O}[H_2O]}_{K_w} = [H^+][OH^-]$$

A este producto se lo denomina *producto iónico del agua*.

El valor de  $K_w$  a 1 atm de presión y a temperatura de 25 °C es de  $10^{-14}$ .

Por lo tanto:

$$[H^+][OH^-] = 10^{-14}$$

Independientemente si se trate de una solución acuosa o de agua pura, la relación anterior siempre se cumple. Si estamos en presencia de agua pura, cuando se disocia se obtienen cantidades iguales de protones y oxidrilos, por lo que sus molaridades son iguales, y decimos que estamos en presencia de una solución neutra. De la ecuación anterior podemos inferir que si estas concentraciones son iguales y su producto es  $10^{-14}$  entonces la concentración de cada una resulta:

$$[H^+] = [OH^-] = 10^{-7}$$

Si la concentración de protones es mayor de  $10^{-7}$ , decimos que estamos en presencia de una *solución ácida*, ya que  $[H^+] > [OH^-]$  y por el contrario, si la concentración de protones es menor a  $10^{-7}$  molar, estaremos en presencia de una *solución básica o alcalina* debido a que  $[H^+] < [OH^-]$

## Concepto de pH

En el apartado anterior vimos que las concentraciones de ion  $H^+$  en soluciones acuosas son números muy chicos y por tanto difíciles de trabajar con ellos, con lo cual Sorensen propuso una medida más práctica para expresar dicha concentración denominada pH (potencial de iones  $H^+$ ). El pH de una solución se define entonces como el logaritmo decimal de la inversa de la concentración del ion hidrógeno (en moles/L):

$$pH = \log \frac{1}{[H^+]} = -\log [H^+]$$

Por ejemplo, si  $[H^+] = 10^{-4}$  M entonces:

$$pH = \log \frac{1}{[H^+]} = -\log[H^+] = -\log 10^{-4} = 4$$

En la Tabla 4.2 se presentan ejemplos de valores de pH de algunos fluidos comunes.

**Tabla 4.2: pH de algunos fluidos comunes.**

Fluido	pH
Jugo gástrico	1,0-2,0
Jugo de limón	2,4
Orina	4,8-7,5
Saliva	6,4-6,9
Leche	6,5
Sangre	7,35-7,45
Lágrimas	7,4

En la Tabla 4.3 se presentan diferentes concentraciones de iones hidrógeno y su correspondiente pH. Podemos ver que una disminución de dicha concentración, implica un aumento del pH, además, soluciones con pH menores a 7 (concentraciones de protones mayores a  $10^{-7}$ ) son ácidas, soluciones con pH mayores a 7 (concentraciones de protones menores a  $10^{-7}$ ) son alcalinas y el valor de pH= 7 corresponde a la neutralidad ya que la concentración de protones es la misma que la de oxhidrilos.

**Tabla 4.3: Concentraciones de iones hidrógenos y su correspondiente pH.**

$[H^+]$ [M]	pH	Solución
$10^{-1}=0,1$	1	Ácida
$10^{-3}=0,001$	3	Acida
$10^{-5}=0,00005$	5	Acida
$10^{-7}=0,0000001$	7	Neutra
$10^{-9}=0,000000001$	9	Alcalina
$10^{-11}=0,00000000001$	11	Alcalina
$10^{-13}=0,0000000000001$	13	Alcalina

Análogamente se puede definir el **pOH** (potencial de oxhidrilos) como:

$$pOH = \log \frac{1}{[OH^-]} = -\log[OH^-]$$

y conociendo que:

$$[H^+][OH^-] = 10^{-14}$$

Aplicando -logaritmo a ambos miembros obtenemos:

$$-\log [H^+] - \log [OH^-] = -\log 10^{-14} = 14$$

Y por consiguiente:

$$\text{pH} + \text{pOH} = 14$$

La ecuación obtenida anteriormente siempre se cumple.

## Cálculo de pH

Para calcular el pH de una sustancia debemos en primer lugar conocer de qué tipo de sustancia se trata, ácida o base, fuerte o débil, ya que su comportamiento en solución es diferente.

### Cálculo del pH de ácidos y bases fuertes

Como mencionáramos anteriormente, si estamos en presencia ya sea tanto de un ácido como de una base fuerte, éstos se disocian completamente, con lo cual la concentración original será la cantidad de protones u oxhidrilos que aporten al medio, para un ácido o una base respectivamente. Graficaremos esto con dos ejemplos.

- a) Calcular el pH de una solución de ácido clorhídrico 0,02 M.

Para calcular el pH necesito la  $[\text{H}^+]$

¿Cuál es el valor de  $[\text{H}^+]$ ?

El HCl es un ácido fuerte,  $\text{HCl} \Rightarrow \text{H}^+ + \text{Cl}^-$ , por lo tanto en la solución voy a tener solo iones  $\text{H}^+$  y  $\text{Cl}^-$ .

En este caso, como  $[\text{H}^+] = 0,02 \text{ M}$ , aplicando la fórmula de pH, decimos que:

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+] = -\log 0,02 = 1,69$$

El resultado de pH que obtuvimos es coherente con el tipo de sustancia, ya que se trata de un ácido, con lo cual su pH debe ser menor a 7.

- b) Calcular el pH de una solución de hidróxido de sodio 0,002 M.

En este caso tenemos una base fuerte, NaOH, con lo cual aporta al medio  $\text{OH}^-$  y no  $\text{H}^+$ .

¿Cómo calculo el pH?

En primer lugar debo calcular cuánto  $\text{OH}^-$  aporta. Como mencionamos anteriormente, es una base fuerte por lo tanto se encuentra totalmente disociada en  $\text{Na}^+$  y  $\text{OH}^-$ , entonces:

Si  $[\text{OH}^-] = 0,002 \text{ M}$

Al aplicar la fórmula de pOH, decimos que:

$$\text{pOH} = -\log [\text{OH}^-] = -\log 0,002 = 2,69$$

A partir del valor de pOH es factible obtener el pH usando la relación:

$$\text{pH} + \text{pOH} = 14$$

Por consiguiente:  $\text{pH} = 14 - \text{pOH} = 14 - 2,69 = 13,31$

Nuevamente podemos ver que el resultado se condice con el tipo de sustancia a la cual se le está determinando el pH, como es una base su pH deberá ser mayor que 7.

## Cálculo del pH de ácidos y bases débiles

Cuando estamos en presencia tanto de un ácido como de una base débil, debido a que no se disocian completamente, no conocemos a priori la cantidad de  $\text{H}^+$  u  $\text{OH}^-$  que aportan al medio, sólo su concentración original. Como se ha mencionado anteriormente, cuando la sustancia es débil se establece un equilibrio entre los iones disociados y el compuesto sin disociar, y aparece entonces una constante de equilibrio de esta disociación la cual llamaremos  $K_a$  cuando el compuesto que se disocia es un ácido y  $K_b$  cuando estemos en presencia de una base.

A partir de los ejemplos siguientes graficaremos cómo trabajar para calcular el pH de ácidos y bases débiles.

a) Calcular el pH de una solución de ácido acético 0,02 M,  $K_a = 1,8 \times 10^{-5}$ .

Nuevamente, para calcular el pH necesito conocer la  $[\text{H}^+]$ , como el ejemplo es un ácido sabemos que lo que aporta directamente al medio son protones, pero al ser débil no sabemos cuántos. Por lo tanto debemos calcular la  $[\text{H}^+]$  la cual se obtiene de la siguiente ecuación:

$$[\text{H}^+] = \sqrt{C_a K_a}$$

Donde:  $C_a$  = concentración del ácido.

$K_a$  = constante de disociación del ácido.

Esta expresión surge a partir de la ley de acción de las masas detallada anteriormente.

Entonces, para nuestro ejemplo:



$$[H^+] = \sqrt{0,02 \times 1,8 \times 10^{-5}}$$

$$[H^+] = \sqrt{3,6 \times 10^{-7}}$$

$$[H^+] = 6 \times 10^{-4} \text{ M}$$

Este resultado obtenido de  $[H^+]$  es mucho menor que Ca, con lo cual podemos ver que se disocia muy poco.

A partir del valor obtenido de  $[H^+]$  podemos entonces, calcular el pH de la solución:

$$\text{pH} = -\log [H^+] = -\log 6 \times 10^{-4} = 3,22$$

b) Calcular el pH de una solución de hidróxido de amonio 0,002 M,  $K_b = 1,8 \times 10^{-5}$ .

Procedemos en forma análoga, al estar en presencia de una base, esta al disociarse aporta al medio  $OH^-$ , pero al ser débil el valor de dicha concentración no la conozco, debo calcularla a partir de la siguiente ecuación:

$$[OH^-] = \sqrt{C_b K_b}$$

Dónde:  $C_b$  = concentración de la base.

$K_b$  = constante de disociación de la base.

$$[OH^-] = \sqrt{0,002 \times 1,8 \times 10^{-5}}$$

$$[OH^-] = \sqrt{3,6 \times 10^{-8}}$$

$$[OH^-] = 1,89 \times 10^{-4} \text{ M}$$

A partir de este dato, podemos calcular pOH:

$$\text{pOH} = -\log [OH^-] = -\log 1,89 \times 10^{-4} = 3,72$$

Luego:

$$\text{pH} = 14 - \text{pOH} = 14 - 3,72 = 10,28$$

## **Importancia biológica del concepto de pH. Equilibrio ácido-base del organismo**

Cuando se habla de equilibrio ácido- base, suele hacerse referencia a la regulación de la concentración de ion hidrógeno,  $[H^+]$ , en los líquidos corporales. El mantenimiento de este ion es fundamental, ya que las variaciones, por ligeras que sean, tienen importantes consecuencias en la fisiología animal provocando alteraciones químicas celulares, retardándolas o acelerándolas. Un cambio en el pH influye, por tanto en la actividad biológica de las enzimas, hormonas y en la distribución de iones a través de la membrana.

Los valores extremos de pH del plasma compatibles con la vida son 6,8-7,8 y en condiciones normales oscila entre 7,35 y 7,45. Para mantener y regular el pH dentro de estos límites, el organismo moviliza una serie de mecanismos como son los buffer fisiológicos y la eliminación de ácidos y bases por compensación respiratoria y renal. Es por ello que en este apartado hablaremos de los sistemas buffer del organismo y sus efectos para mantener la homeostasis de todo ser vivo.

El proceso por el cual se produce un desequilibrio en el pH sanguíneo es clasificado en función de su valor, así, si la sangre presenta un pH inferior a 7,35, se denomina acidemia, y, por el contrario, si la dirección es hacia valores de pH superior a 7,45 se habla de alcalemia. A nivel orgánico, hablamos de acidosis cuando el pH está por debajo del rango de normalidad para esa solución (por ejemplo, acidosis respiratoria) y de alcalosis cuando dicho valor está por encima del rango (alcalosis metabólica).

### **Mecanismo de regulación del pH. Soluciones reguladoras**

Una solución buffer o reguladora se caracteriza por amortiguar el cambio de pH generado por la adición moderada de un ácido o un álcali. Son de gran importancia biológica, debido principalmente que al localizarse en los líquidos orgánicos permiten mantener el pH del medio interno dentro de los rangos compatibles con la vida. Estas soluciones amortiguadoras son los primeros sistemas en ponerse en funcionamiento ante los cambios de pH a nivel orgánico.

Están compuestas por un ácido débil y su sal conjugada (formada ésta por una base fuerte y un ácido de débil) o por una base débil y su sal conjugada (formada por un ácido fuerte y una base débil).

A continuación, citaremos algunos ejemplos:

1. Ácido Acético – Acetato de sodio ( $CH_3COOH - CH_3COONa$ )
2. Ácido carbónico – Bicarbonato de sodio ( $CO_3H_2 - CO_3HNa$ )
3. Ácido Cianhídrico – Cianuro de sodio ( $HCN - CNNa$ )

4. Hidróxido de amonio – Cloruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{OH} - \text{ClNH}_4$ )
5. Fosfato diácido de potasio – Fosfato monoácido de sodio ( $\text{PO}_4\text{H}_2\text{K} - \text{PO}_4\text{HNa}_2$ )
6. Fosfato diácido de potasio- Fosfato monoácido de potasio ( $\text{PO}_4\text{H}_2\text{K} - \text{PO}_4\text{HK}_2$ )

En los últimos dos ejemplos que mencionamos, se debe tener en cuenta que responde como sal, la sustancia que tiene menor cantidad de  $\text{H}^+$  y como ácido, la sustancia que tiene mayor cantidad de protones.

### Cálculo de pH de una solución buffer

Para el cálculo del pH de una **solución buffer o reguladora ácida** hacemos uso de la ecuación de Henderson Hasselbach, esto es:

$$\text{pH} = \text{pKa} + \log \frac{C_s}{C_a}$$

Donde  $C_s$ = Concentración de la sal en la solución;

$C_a$ = Concentración del ácido en la solución;

$\text{pKa} = -\log K_a$ , con  $K_a$  constante de disociación del ácido.

La deducción de esta ecuación escapa a los fines de este libro, pero debemos aclarar que surge de plantear la ley de acción de las masas para la disociación de un ácido débil ( $\text{HA} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{A}^-$ ).

Si estamos en presencia de una **solución buffer básica**, es decir formada por una base débil y su sal conjugada, entonces la ecuación de Henderson Hasselbach se expresa como:

$$\text{pH} = \text{pKa} + \log \frac{C_s}{C_a}$$

Donde  $C_s$ = Concentración de la sal en la solución;

$C_b$ = Concentración de la base en la solución;

$\text{pKb} = -\log K_b$ , con  $K_b$  constante de disociación de la base.

El pH en este caso lo obtenemos haciendo:

$$\text{pH} = 14 - \text{pOH}$$

## Elección de un buffer

Los buffers son, como mencionamos, mezcla de ácidos o bases débiles con sus sales, y su zona de utilidad como tales, depende lógicamente del valor de su pK. Este es un factor limitante a la hora de seleccionar una solución reguladora. Con lo cual, para preparar una solución reguladora para mantener un cierto pH, es necesario elegir un ácido (o base) con un valor de pKa (o pKb) tan próximo como sea posible al pH que desea obtener, tal que la capacidad reguladora del mismo sea máxima.

## Principales sistemas buffer del organismo

Los sistemas buffers que están presentes en la sangre y el líquido extracelular se detallan en la Tabla 4.4.

En la tabla podemos ver que el sistema bicarbonato/ácido carbónico ( $\text{HCO}_3^- / \text{H}_2\text{CO}_3$ ) tiene un pKa de 6,1, por lo que al considerar que el pH sanguíneo es de 7,40, este valor estaría lejos de la zona de máxima capacidad reguladora del buffer y sería poco útil como amortiguador químico. Sin embargo, opera con gran eficiencia debido a varios factores: a) La relación  $\text{HCO}_3^- / \text{H}_2\text{CO}_3$  es muy alta (20/1), lo que le proporciona una alta capacidad tampón frente a los ácidos; 2) es un sistema abierto, con lo que el exceso de  $\text{CO}_2$  puede ser eliminado por ventilación pulmonar de manera rápida; y 3) además, el  $\text{HCO}_3^-$  puede ser eliminado por los riñones mediante un sistema de intercambio con solutos.

La hemoglobina (Hb) actúa, a través de su parte proteica, como un buen sistema amortiguador de los cambios de pH de la sangre (sistema Hemoglobina/Hemoglobinato; Hb/HHb).

Las proteínas plasmáticas actúan, frente a una carga ácida, como un sistema amortiguador (sistema Proteína/ Proteinato;  $\text{Pr}^-/\text{HPr}$ ). Por los distintos tipos de proteínas que hay en el plasma es muy difícil dar un valor único de pK (Tabla 4.4). Como sistema amortiguador, ocupan un lugar intermedio en importancia, entre el sistema del bicarbonato y de la hemoglobina.

Los fosfatos tienen un muy escaso papel como amortiguadores en la sangre. Son importantes, sin embargo, como amortiguadores intracelulares, por la abundancia de fosfatos orgánicos en este compartimiento. Además, cumplen una función muy importante como buffers de la orina.

**Tabla 4.4: Principales amortiguadores fisiológicos**

Sistema	pK
---------	----

$\text{HCO}_3^-/\text{H}_2\text{CO}_3$	6,1
Hb/HHb	7,2
Pr <sup>-</sup> / HPr	
- Cadena lateral histidina	5,6-7
- Grupos amino N-terminal	7,6-8,4
$\text{HPO}_4^{2-} / \text{H}_2\text{PO}_4^-$	6,8

### Control respiratorio y renal del equilibrio ácido- base

Como se había mencionado anteriormente, los mecanismos de control del equilibrio ácido-base son los amortiguadores fisicoquímicos, control respiratorio y la regulación renal. En este apartado hablaremos del control respiratorio y el renal:

#### a) Control respiratorio:

Este control autorregula el contenido de  $\text{CO}_2$ , mediante receptores específicos que están situados en el bulbo raquídeo, este órgano lo que hace es regular la ventilación. Por ejemplo, si el  $\text{CO}_2$  está aumentado, para poder eliminarlo, se producirá un aumento de la frecuencia respiratoria (hiperventilación), mientras que si hay una disminución de la concentración del  $\text{CO}_2$ , habrá un descenso de la frecuencia respiratoria (hipoventilación). Este caso podemos decir que la regulación es considerada fisiológica, teniendo una capacidad amortiguadora dos veces superior a los amortiguadores químicos estudiados anteriormente.

#### b) Control renal:

Este control es la última oportunidad que tiene el organismo de regular los desequilibrios generados en el cuerpo del animal. Si bien es el sistema más eficaz, su respuesta es relativamente lenta. En estos casos, el riñón lo que hace será excretar el exceso de protones por la orina ante un exceso de ácidos en los líquidos extracelulares, o en caso de alcalinidad, excretar fundamentalmente  $\text{HCO}_3\text{Na}$ .

A continuación en la Tabla 4.5, veremos cómo actúan estos sistemas de control ante distintas situaciones patológicas, para poder llegar a conseguir el equilibrio del medio interno (Homeostasis).

**Tabla 4.5: Diversas patologías y compensación del organismo.**

<b>Patología</b>	<b>Causas</b>	<b>Compensación</b>
<b>Acidosis respiratoria</b>	<b>Hipoventilación</b> <b>Neuropatías</b>	<b>Eliminación de H<sup>+</sup> (riñón)</b> <b>Amortiguación con Hb</b> <b>↑ bicarbonato en células renales (sangre)</b>
<b>Alcalosis respiratoria</b>	<b>Hiperventilación</b> <b>Altura</b> <b>Encefalitis</b>	<b>↑ bicarbonato (riñón)</b> <b>↓ Eliminación de H<sup>+</sup></b>
<b>Acidosis metabólica</b>	<b>Insuficiencia renal</b> <b>Diabetes</b> <b>Diarrea</b>	<b>Hiperventilación ↑CO<sub>2</sub> (pulmón)</b> <b>↑ NH<sub>4</sub>Cl y Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> (riñón)</b>
<b>Alcalosis metabólica</b>	<b>Vómitos</b> <b>Sales orgánicas</b>	<b>Hipoventilación ↑CO<sub>2</sub> (pulmón)</b> <b>↑ bicarbonato (riñón)</b>

## **Métodos de determinación de pH**

En la práctica, el pH se determina por dos métodos: potenciométrico y colorimétrico, siendo el primero el más preciso.

## Método Potenciométrico

Este método se basa en el hecho que entre dos soluciones con distinta  $[H^+]$  se establece una diferencia de potencial ( $\Delta V$ ). Esta diferencia de potencial es proporcional a la  $[H^+]$ , y puede ser calculada a partir la ecuación de Nernst que vimos en el Capítulo 3.

Experimentalmente, la medida del pH es relativa, ya que no se determina directamente la concentración de  $H^+$ , sino que se compara el pH de una muestra con el de una solución patrón de pH conocido (referencia). Para esta determinación se utiliza un electrodo de pH. Cuando el electrodo entra en contacto con la sustancia de pH desconocido se establece un potencial a través de la membrana de vidrio que recubre al electrodo. El electrodo de referencia puede ser externo o puede estar integrado en el electrodo de pH (Fig. 4.1). Estos electrodos conforman lo que se conoce comúnmente como peachímetro. La mayoría de los equipos tienen incorporados sensores de temperatura debido a que el pH es función de dicho parámetro. En la Figura 4.2 se presentan fotografías de peachímetros portátiles en los cuales se puede ver no solo la medida de pH sino también la temperatura.

Mediante este método se puede lograr apreciar diferencias de hasta 0,005 unidades de pH.

La principal desventaja de este instrumento de medida radica en que deben ser calibrados periódicamente para asegurar la precisión, para ello se utilizan soluciones buffers de calibración de pH conocidos (generalmente de pH 4 y 7).

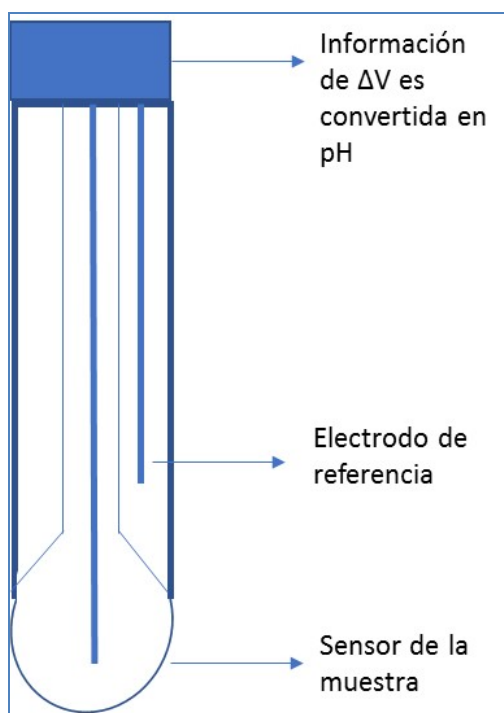


Figura 4. 1: Esquema de electrodo de pH.



Figura 4. 2: Imágenes de peachímetros portátiles con sensor de temperatura.

### Método Colorimétrico

Como su nombre lo indica, este método se basa en el cambio de color que experimentan determinados compuestos, *indicadores*, de acuerdo al pH del medio donde se encuentren.

Este procedimiento no requiere de equipos costosos, pero puede sufrir interferencias debido a la presencia de turbidez, material coloidal, alto contenido de sales, etc. Además el material empleado, soluciones o papeles indicadores, están expuestos a deterioro. Para estimaciones aproximadas es el método adecuado.

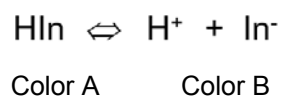
Los indicadores son ácidos o bases orgánicas débiles que tienen la propiedad de cambiar de color de acuerdo al pH del medio. Ese cambio de color corresponde a un cambio en la estructura del indicador. Ocurre en un cierto rango de pH conocido como intervalo de viraje o zona de viraje del indicador.

### Teoría de los Indicadores

Para entender un poco más este tema y profundizar sobre el intervalo de viraje debemos tener en cuenta una expresión que es  $K_{ind}$ . Este factor depende de la relación entre las concentraciones de la forma disociada y sin disociar y por esto es una función de la concentración de  $H^+$  o del pH de la solución.

Si tenemos indicador ácido, HIn, en solución se establece:





El pH de esta solución se calcula con la siguiente expresión.

$$\text{pH} = \text{pK}_{\text{ind}} + \log \left[ \frac{[\text{In}^-]}{[\text{HIn}]} \right]$$

El cambio de color de un indicador es apreciable cuando la concentración de la forma  $\text{In}^-$  es igual a 10 veces la concentración de la forma  $\text{HIn}$  o viceversa.

El intervalo de viraje se puede calcular reemplazando dichas relaciones de concentración:

$$\text{pH} = \text{pK}_{\text{ind}} + \log 10/1$$

$$\text{pH} = \text{pK}_{\text{ind}} + \log 1/10$$

Luego:

$$\text{pH} = \text{pK}_{\text{ind}} \pm 1$$

### Clasificación

Los indicadores se clasifican en:

**Monocrómicos**: Se llaman así porque el cambio de color se efectúa del incoloro a la forma coloreada y viceversa. Por ejemplo:

Fenolftaleína (intervalo de viraje pH 8-10; incoloro- rojo). En medio ácido es incoloro, siendo su pH menor a 8 y en medio básico adquiere el color rojo, cuando el pH del medio es 8 o mayor.

Timolftaleína (intervalo de viraje 9-11; incoloro-azul).

Verde de malaquita (intervalo de viraje 0,2 – 1,8 incoloro- verde azulado).

**Dicrómicos**: Sin disociar tienen un color y disociados tienen otro color, es decir, pasan de un color a otro. Por ejemplo:

Naranja de metilo, también llamado heliantina (intervalo de viraje: 3,2-4,4; rojo-amarillo).

Azul de bromotimol (intervalo de viraje 6-7,6). Este indicador adquiere color amarillo cuando el pH es menor a 6; color verde entre pH 6- 7,6 y azul cuando es mayor a 7,6.

Rojo de fenol (intervalo de viraje 3- 4,6; color amarillo- azul).

**Universales**: Son mezclas de indicadores, pudiendo ser soluciones o papeles indicadores. A diferencia de los anteriores tienen un mayor rango de viraje. Por ejemplo: Bogen; Yamada; Smith; B.D.H (indicadores líquidos) y Papel indicador universal, que se esquematiza en la figura 4.3 de este apartado.



*Figura 4.3: Indicador Universal- Tiras de papel*

## Referencias

- Cunningham, J; Bradley,G.(2009). Capítulo 50 Homeostasis ácido-básica. En J. Cunningham; G. Bradley. *Fisiología Veterinaria* (pp. 663-676). España: Edición Elsevier. S.L
- Dukes, H. (1973). Equilibrio ácido-base. En: W. Reece (Ed). *Fisiología de los animales domésticos* (pp 70-72). Madrid, España: Editorial Aguilar.
- Frumento, A. S. (1995). Capítulo 17: El ion hidrógeno. En A. S. Frumento. *Biofísica (3ra edición)*. (pp. 321-342). Madrid: Mosby / Doyma Libros.
- Frumento, A. S. (1995). Capítulo 18 Biofísica del estado ácido-base. En A. S. Frumento. *Biofísica (3ra edición)*. (pp. 343-364). Madrid: Mosby / Doyma Libros.
- Montoreano, R (Octubre 2016). Capítulo 8 El balance de hidrogeniones y el equilibrio ácido base. En R. Montoreano. *Manual de Fisiología y Biofísica*. Recuperado de [www.fundabiomed.fcs.uc.edu.ve/incio\\_montoreano.htm](http://www.fundabiomed.fcs.uc.edu.ve/incio_montoreano.htm)
- Parisi, M. (2001). Capítulo 2 El hombre como sistema integrado. La organización compartimental. En M. Parisi *Temas de biofísica (1ª edición)*. (pp. 43-46). Santiago, Chile: McGraw-Hill Interamericana de Chile LTDA.
- Zápico Torneros, J (1995) 36. Equilibrio ácido-base. En: A. García Sacristán *Fisiología Veterinaria*. (pp. 477-485). España: Editorial. Mc Graw-Hill Interamericana.

# CAPÍTULO 5

## Biofísica de los sentidos animales

*Mariana Fernández Blanco, Pablo de la Sota*

El objetivo de este Capítulo es el estudio de la luz y el sonido como fenómenos ondulatorios, para luego comprender de qué manera los seres vivos perciben los fenómenos luminosos y sonoros.

### Ondas: definición y clasificación

Las ondas son perturbaciones de alguna propiedad del medio (presión, campo eléctrico, campo magnético) que se propagan produciendo transporte de energía y no de materia. Esta propagación puede realizarse en un medio material o en el vacío. Cuando las ondas necesitan de un medio material para propagarse, estas se denominan **mecánicas** (por ejemplo las ondas sonoras), en cambio hay otro tipo de ondas que no necesitan de un medio material para su propagación, es decir que pueden hacerlo en el vacío, y este es el caso de las ondas **electromagnéticas**, las que están asociadas a un campo eléctrico y otro magnético, que vibran en planos perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección de la onda (por ejemplo la luz) (Fig. 5.1).

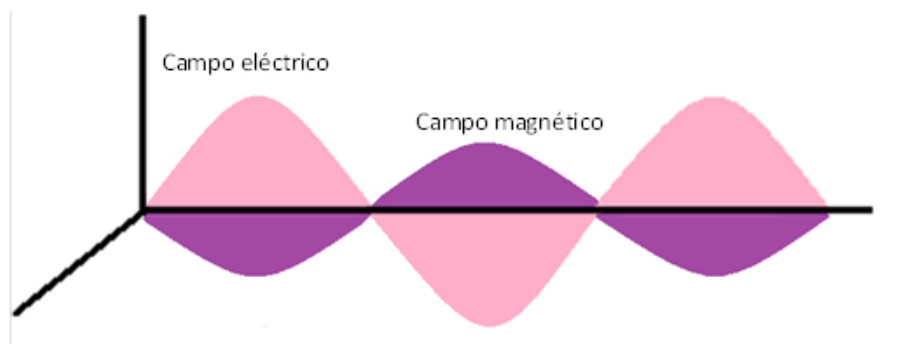


Figura 5.1: Ondas electromagnéticas. Campos eléctrico (vertical) y magnético (horizontal).

*Figura 5.1: Ondas electromagnéticas. Campos eléctrico (vertical) y magnético (horizontal).*

Además, las ondas pueden ser **transversales** o **longitudinales**. Cuando hablamos de la luz, nos referimos a ondas transversales debido a que el fenómeno ondulatorio es transversal en relación a la dirección de propagación de la energía. Por otro lado, cuando nos referimos a las ondas mecánicas, éstas pueden ser longitudinales o transversales. En el caso de las ondas mecánicas transversales, las partículas del medio transmisor vibran de manera perpendicular a la dirección de avance de la onda como sucede en las ondas del mar, a diferencia de las ondas mecánicas longitudinales en las que las partículas del medio vibran paralelamente a la dirección de la onda, como es el caso de las ondas sonoras.

Las ondas, en general, pueden ser caracterizadas por los siguientes elementos (Fig. 5.2):

- **Período ( $T$ ):** es el *tiempo* que necesita un fotón (partícula de energía) para realizar una oscilación transversal completa. Se mide en segundos.
- **Longitud de onda ( $\lambda$ ):** es el *espacio* que tarda un fotón en realizar una oscilación completa. Se mide en unidades de longitud.
- **Frecuencia ( $\nu$ ):** es el *número de oscilaciones* que realiza un fotón en un segundo. También podemos decir que es la inversa del Período. La unidad es el Hertz (1Hz = 1 ciclo/seg) (Fig. 5.3.)
- **Amplitud (A):** *distancia* vertical entre el punto medio y la cresta o el valle de la onda. Altura de la onda.

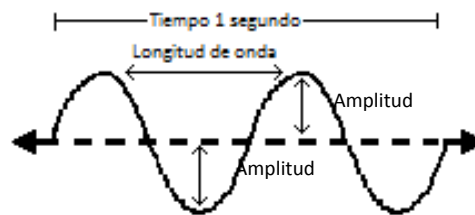


Figura 5.2: Longitud de onda, amplitud y frecuencia. En este ejemplo la frecuencia es de 2 ciclos por segundo (2 Hz).

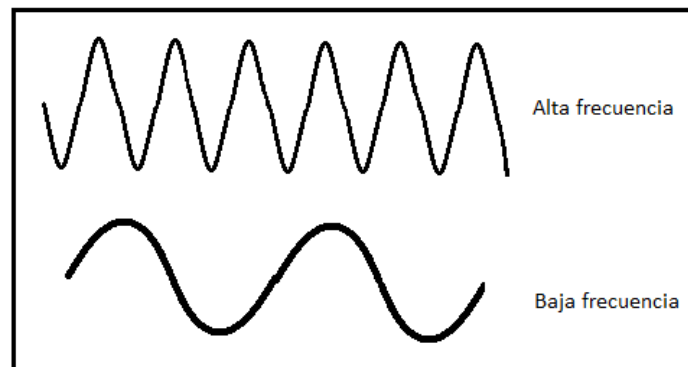


Figura 5.3: Esquema de ondas con diferentes frecuencias.

## Teoría cuántica de Planck

Según esta teoría, el elemento o unidad básica de las radiaciones electromagnéticas se denomina **fotón** o **cuanto** (paquete o partícula de energía). Cuando los fotones se desplazan en el espacio desarrollan dos movimientos: uno, que realizan en el sentido del desplazamiento a velocidad uniforme, y otro transversal con respecto al primero, que es de tipo oscilatorio. La combinación de ambos movimientos genera el movimiento ondulatorio característico. El desplazamiento de los fotones en el vacío se produce a una velocidad de 300000 km/seg.

$$c = \frac{\lambda}{\tau}; \quad v = \frac{1}{\tau}$$
$$c = \lambda \cdot v \quad v = \frac{c}{\lambda}$$

Sabiendo que:  $c$  = velocidad de la luz;

$\tau$  = período

$\lambda$  = longitud de onda

$v$  = frecuencia

La **energía** que es transportada por cada fotón, puede determinarse mediante el uso de la ecuación de Planck:

$$E = h \cdot v$$
$$E = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

Donde:  $E$  = energía

$h$  = cte. de Planck ( $6,6 \cdot 10^{-34}$  Joule . seg)

$v$  = frecuencia

A partir de esta ecuación podemos ver que radiaciones de mayor frecuencia implican mayor energía, como es el caso de los rayos X y la radiación gamma.

## **Espectro electromagnético. La luz**

Se denomina espectro electromagnético al conjunto de todas las ondas electromagnéticas (Fig. 5.4). Actualmente estamos expuestos a una gran variedad de radiaciones electromagnéticas, tanto provenientes de fuentes naturales (como es el caso de la radiación solar) como de fuentes artificiales generadas por el hombre (asociadas a las comunicaciones). A continuación se hará una breve descripción de las radiaciones que componen el espectro electromagnético, mencionándolas de menor a mayor frecuencia (para más detalles ver el Capítulo 10) (Fig. 5.4).

*Microondas y Radiofrecuencias:* son radiaciones emitidas por aparatos electrónicos, algunos de ellos utilizados en radiocomunicaciones, televisión, radio, radares, etc. Corresponden a las de menor frecuencia del espectro.

*Radiación infrarroja:* los cuerpos calientes generan este tipo de radiación. Constituye uno de los mecanismos de pérdida de calor por parte de los seres vivos (ver Capítulo 9). Se utiliza en Medicina Veterinaria para el tratamiento de afecciones del aparato locomotor tales como dolores musculares, articulares y tendinosos.

*Luz visible:* corresponde a las radiaciones electromagnéticas que son percibidas por el ojo humano. Su longitud de onda oscila entre 400 y 780 nm.

*Radiación ultravioleta:* constituye el principal componente de la radiación solar. Desde el punto de vista de su aplicación, es utilizada para esterilizar superficies, material quirúrgico y odontológico. También se aplica sobre la superficie de algunos alimentos como frutas, vegetales y carnes, con el objetivo de reducir la carga de microorganismos y así, prolongar su vida útil.

*Rayos X:* son radiaciones de alta frecuencia con gran poder de penetración. Tienen aplicación como método de diagnóstico (radiología, radioscopía, tomografía computarizada) y tratamiento (por ejemplo, para la destrucción de células tumorales).

*Radiación gamma:* estas radiaciones son de alta energía, tienen mayor frecuencia y menor longitud de onda que las mencionadas anteriormente, por lo tanto, son las más penetrantes. Se utilizan en técnicas de diagnóstico tales como la centellografía, la gammagrafía y la tomografía por emisión de positrones.

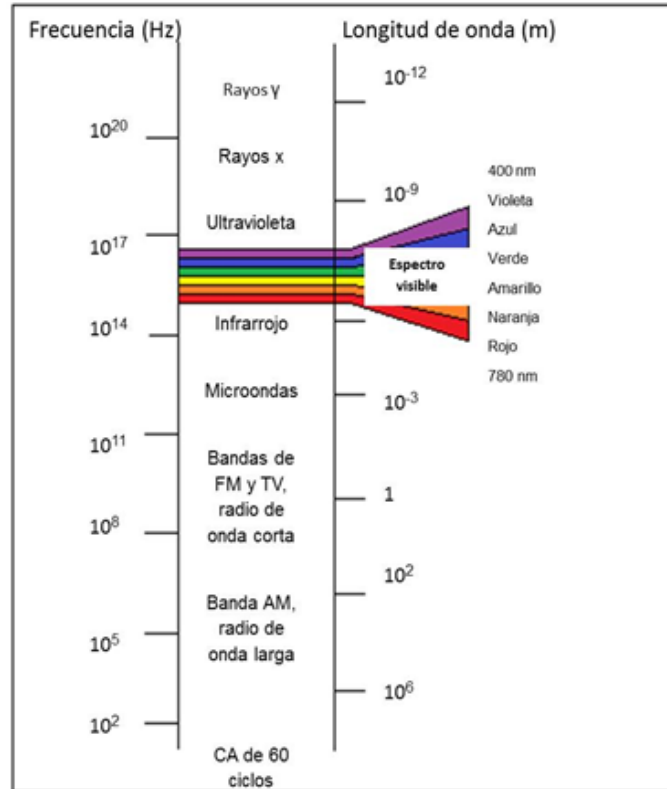


Figura 5.4: Espectro electromagnético.

## Óptica geométrica

Hemos dicho anteriormente que la luz corresponde a las radiaciones electromagnéticas que son percibidas por el ojo humano; su longitud de onda oscila entre 400 y 780 nm. De acuerdo con la óptica geométrica, un haz de luz está constituido por un grupo de rayos, que se propagan en línea recta y de manera independiente. La trayectoria de dichos rayos no se modifica si su sentido de propagación es inverso (Principio de Reversibilidad de los caminos ópticos). La luz puede experimentar diferentes fenómenos tales como la reflexión y refracción.

### Reflexión de la luz. Leyes

Cuando un rayo luminoso (rayo incidente) se encuentra en su trayectoria con una superficie plana pulida (espejo), experimenta el fenómeno de reflexión. Esto significa que el rayo incidente, luego de chocar contra dicha superficie modifica su dirección, de manera que se



invierte el sentido de su propagación (Figura 5.5), encontrándose el rayo incidente y el reflejado en el mismo medio. La visión de los objetos es posible gracias a este fenómeno, ya que si dicho objeto no estuviera iluminado (a menos que sea una fuente por sí misma) permanecerá invisible. De esta manera, los rayos provenientes de una fuente luminosa se reflejan sobre la superficie del objeto revelándose así, los detalles de forma, color y tamaño. La *primera ley de la reflexión* enuncia que el rayo incidente, la normal y el rayo reflejado se encuentran en un mismo plano. Según la *segunda ley de la reflexión* el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

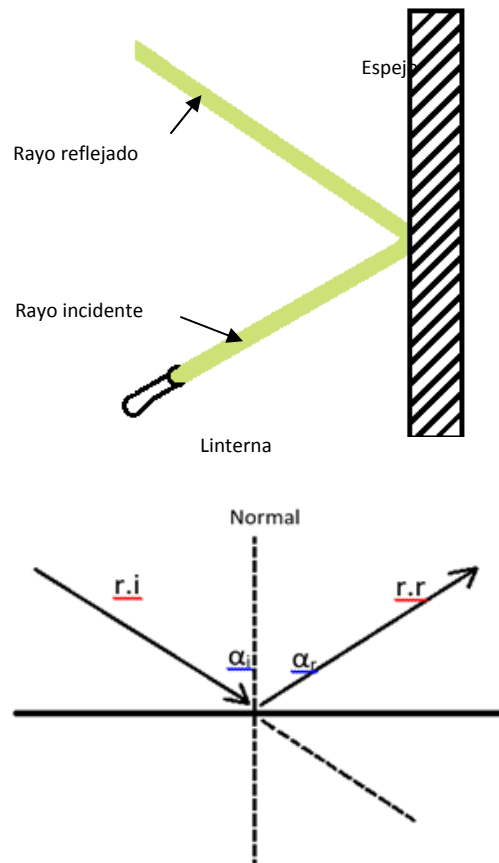


Figura 5.5: Reflexión de la luz.  $r.i$ = rayo incidente;  $r.r$ = rayo reflejado;  $\alpha_i$ = ángulo de incidencia;  $\alpha_r$ = ángulo de reflexión.

### Refracción de la luz. Leyes

Se entiende por refracción al cambio de dirección que experimenta un rayo de luz al pasar de un medio de propagación a otro, debido a que se propaga con distinta velocidad. El fenómeno de refracción tiene lugar ya que ambos medios poseen una densidad óptica diferente (índice de

refracción). El límite que separa dichos medios se denomina *dioptra*. De acuerdo con la *primera ley de la refracción*, el rayo incidente, la normal y el rayo refractado se encuentran en un mismo plano. Según la *segunda ley de la refracción* el cociente entre el seno del ángulo de incidencia ( $\alpha_i$ ) y el seno del ángulo refractado ( $\alpha_r$ ) se denomina índice de refracción ( $n_{2-1}$ ) (Fig, 5.6).

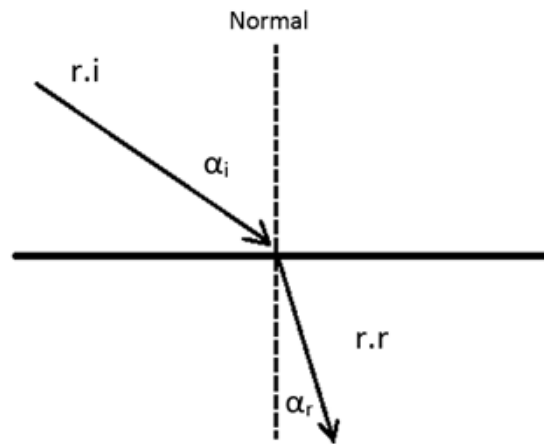


Figura 5.6: Refracción de la luz. *r.i*= rayo incidente; *r.r*= rayo refractado;  $\alpha_i$ = ángulo de incidencia;  $\alpha_r$ = ángulo de refracción.

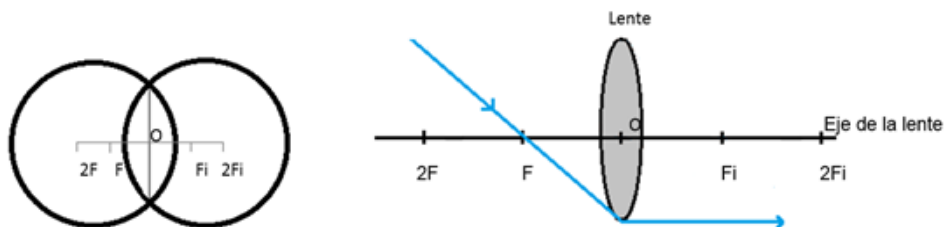
El índice de refracción ( $n$ ) indica la rapidez con que la luz atraviesa un material transparente. A continuación se presenta una tabla con los índices de refracción (a  $\lambda = 590 \text{ nm}$ ) de algunas sustancias a modo de ejemplo (Tabla 5.1).

**Tabla 5.1: Índices de refracción de diferentes materiales**

Sustancia	n
Aire	1,00029
Agua	1,33
Hielo	1,31
Alcohol etílico	1,36
Cristalino	1,39
Aceite	1,50
Vidrio (varía según el tipo)	1,45-1,70
Diamante	2,42

## Lentes

Una lente es un instrumento óptico limitado por dos dioptros concurrentes, de las cuales una por lo menos es curva. Los elementos que constituyen una lente son: dos superficies ópticas, un centro óptico (O), un eje óptico o eje de la lente, un foco objeto (F) y un foco imagen (Fi) (Fig. 5.7).



*Figura 5.7: Elementos de una lente.*

Desde el centro óptico (O) a cada foco (F;  $F_i$ ) queda determinada una distancia conocida como distancia focal, siendo  $2F$  y  $2F_i$  el doble de la distancia focal.

Las lentes pueden ser *positivas* (convergentes) o *negativas* (divergentes). Cuando los rayos luminosos atraviesan una lente positiva (que puede ser biconvexa o convexo-cóncava) decimos que convergen, ya que se acercan al eje óptico. Por el contrario, cuando los rayos atraviesan una lente negativa (bicóncava o convexo-cóncava) divergen, es decir, se alejan del eje óptico.

### Formación de imágenes

Cuando los rayos luminosos que inciden sobre un objeto alcanzan el ojo, atraviesan diferentes estructuras (que serán descritas en otra sección de este capítulo) experimentando los fenómenos de refracción descritos anteriormente. Dichos rayos convergen en la retina y formarán una imagen, que es la representación del objeto que se está observando.

Las imágenes pueden ser puntuales, reales o virtuales, invertidas o derechas, y de mayor, menor o igual tamaño (de acuerdo a la ubicación del objeto, como se describe más adelante). El único caso de *imagen puntual* se produce cuando el objeto se encuentra ubicado en el infinito, debido a que los rayos luminosos luego de atravesar la lente convergen en el foco imagen. La imagen será *real y derecha* cuando los rayos convergen en la retina (que actúa como pantalla), y *virtual e invertida* cuando divergen (no convergen en la retina, por lo cual deben proyectarse en sentido inverso para formar la imagen) (Fig. 5.9). A los fines prácticos, analizaremos puntualmente los casos de formación de imágenes de las lentes positivas (convergentes), ya que es el tipo de lente que presenta el ojo. Para realizar la marcha de los rayos luminosos (Fig. 5.8) debemos trazar al menos 2 líneas teniendo en cuenta las siguientes premisas:

- Todo rayo que atraviesa el centro óptico, no experimenta desviación.
- El rayo incidente que pasa por el foco objeto, luego de atravesar la lente, se refracta siguiendo una trayectoria paralela al eje óptico.
- El rayo incidente cuya trayectoria es paralela al eje óptico, se refracta pasando por el foco imagen ( $F_i$ ).

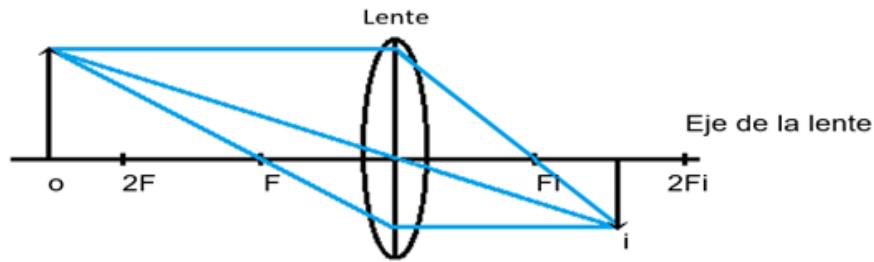


Figura 5.8: Marcha de los rayos luminosos.  $o$  = objeto;  $i$  = imagen real.

Los casos de formación de imágenes se detallan a continuación (Fig. 5.9):

**Caso 1.** El objeto se encuentra ubicado en el infinito. La imagen que se forma es puntual.

**Caso 2.** El objeto se encuentra ubicado a una distancia mayor al doble de la distancia focal ( $>2F$ ). La Imagen que se forma es real, invertida y de menor tamaño. Ejemplo: imagen que se forma en la retina.

**Caso 3.** El objeto se encuentra ubicado sobre el doble de la distancia focal ( $2F$ ). Imagen real, invertida y de igual tamaño.

**Caso 4.** El objeto se encuentra ubicado entre el foco ( $F$ ) y el doble de la distancia focal ( $2F$ ). Imagen real, invertida y de mayor tamaño. Ejemplo: objetivo del microscopio óptico.

**Caso 5.** El objeto se encuentra sobre el foco ( $F$ ). No se forma imagen, ya que los rayos refractados son paralelos (algunos autores sostienen que se forma la imagen en el infinito).

**Caso 6.** El objeto se encuentra entre el foco ( $F$ ) y el centro óptico ( $O$ ). Imagen virtual, derecha y de mayor tamaño. Ejemplo: lupa, ocular del microscopio óptico.

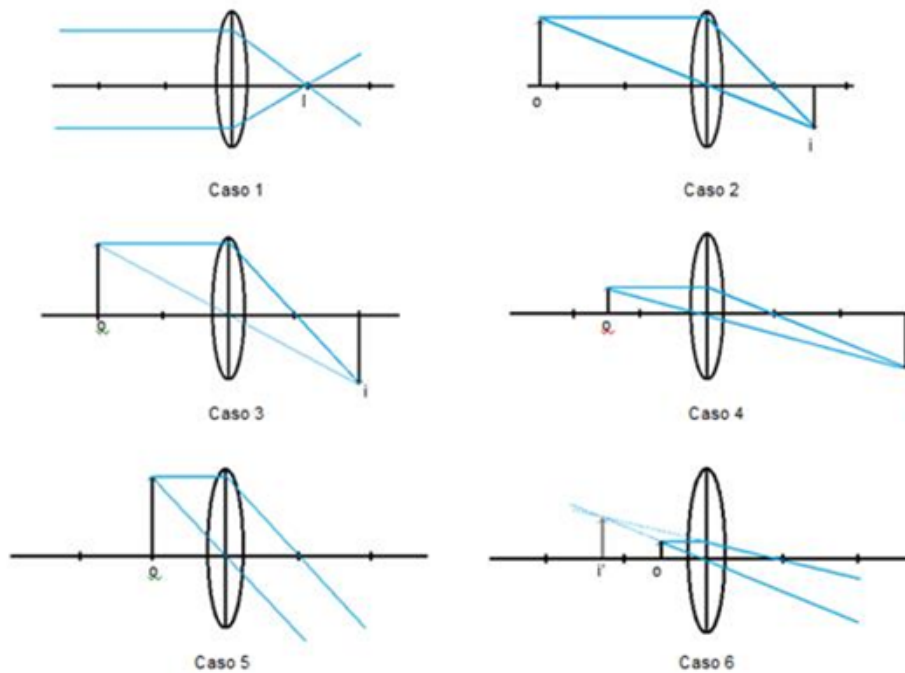


Figura 5.9. Casos de formación de imágenes.  $o$  = objeto;  $i$  = imagen real;  $i'$  = imagen virtual.

## El ojo como sistema óptico

El ojo es un órgano sensorial que consta de un sistema de lentes que le permite enfocar la imagen, proyectarla en la retina, y esa información llega al cerebro a través del nervio óptico. Está constituido por los *anexos* que los protegen (entre ellos los párpados, el tercer párpado y el aparato lagrimal) y el *globo ocular*.

**Tercer párpado o membrana nictitante:** es una estructura anexa del ojo de color blanquecino o rosado, que se ubica en el ángulo medial (o interno) del ojo de los animales domésticos, aves, reptiles y anfibios. Esta membrana está formada por un cartílago en forma de "T", una glándula y tejido linfóide asociado. Además de contribuir con la secreción lagrimal (30-40%), aporta una protección adicional al globo ocular. Ante una agresión directa que podría afectar al ojo, la contracción de los músculos oculares causa su retracción, de manera que el tercer párpado protruye para proteger la córnea. Esta estructura puede ser visible cuando un animal se encuentra bajo la acción de ciertos anestésicos como se observa en la Fig. 5.10.



*Figura 5.10: Felino de 7 meses. Se puede observar el tercer párpado en el ángulo medial de ambos ojos.*

En algunas razas caninas como por ejemplo el Cocker Spaniel o el Basset Hound, el tercer párpado es visible normalmente debido a que son perros que presentan los párpados inferiores muy caídos, pero en otras razas y en los gatos, esta estructura no debería verse en condiciones normales.

### **Globo ocular**

Anatómicamente el globo ocular está formado por tres túnicas: fibrosa, vascular y nerviosa. La túnica fibrosa es la más externa, constituida por la córnea y la esclerótica. La túnica vascular (o úvea) es la capa intermedia, se encuentra pigmentada y está formada por la coroides, los cuerpos ciliares y el iris. La coroides incluye un área que se denomina *tapetum lucidum*, estructura responsable del brillo característico de los ojos de algunos animales durante la noche. La túnica nerviosa es la más interna y está formada por la retina.

La córnea, el cristalino y la retina constituyen los elementos ópticos del ojo, debido a que estos sistemas de lentes son atravesados por los rayos luminosos, produciéndose en ellos una serie de refracciones para finalmente converger en la retina, donde se forma la imagen. Otros componentes que conforman el globo ocular son el humor acuoso y el cuerpo vítreo. A continuación se describen las características de las principales estructuras oculares (Fig 5.11).

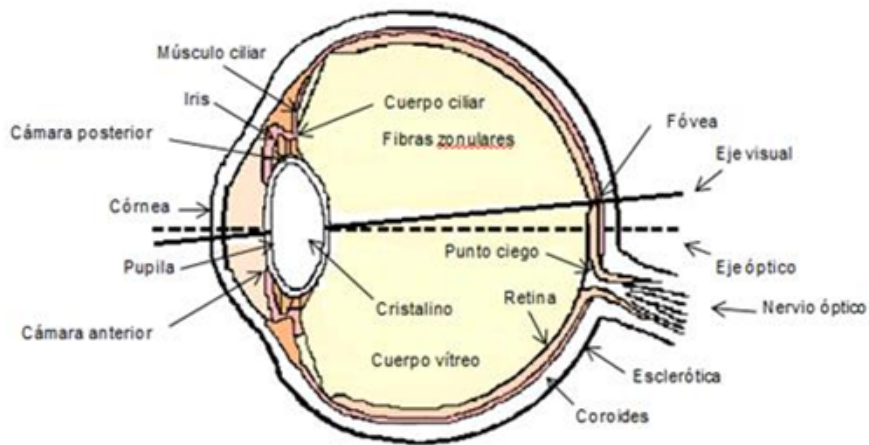


Figura 5.11: El ojo y sus estructuras.

**Córnea:** Lámina de menor espesor en el centro y mayor en la periferia; su transparencia se debe a que es una estructura avascular y a la disposición de las fibras que la componen. Junto con el humor acuoso (que se encuentra en la cámara anterior del ojo) forman una lente cóncavo-convexa. Cualquier alteración de la transparencia de la córnea (heridas, presencia de cuerpos extraños, secreciones), puede afectar la visión.

**Esclerótica:** está formada por tejido conectivo opaco y rígido, de manera que evita que el globo ocular se deforme. En ella se insertan los músculos oculares.

**Iris:** es una estructura pigmentada que actúa como un diafragma, regulando la entrada de luz a través de su abertura, denominada *pupila*.

**Pupila:** es el orificio a través del cual la luz ingresa al ojo. Su forma varía de acuerdo a la especie y a las condiciones de iluminación. Cuando hay buena iluminación la pupila se encuentra contraída para reducir el ingreso de la luz, fenómeno conocido como *miosis*. En estas condiciones, en el caso de los felinos domésticos y en algunos reptiles la pupila tiene forma de hendidura y su posición es vertical, lo cual mejora la visión diurna en los animales de hábitos nocturnos. Sin embargo, cuando un animal está asustado o en estado de alerta o cuando las condiciones de iluminación son pobres, esta estructura se dilata para permitir el ingreso de los rayos luminosos, fenómeno conocido como *midriasis*. En esta situación, las pupilas que normalmente tienen forma de hendidura adquieren una forma casi circular (Fig.5.12). Esto se debe a la acción del sistema nervioso autónomo. En los mamíferos ungulados (caballo, burro, rumiantes, cerdo), la pupila tiene forma rectangular y es horizontal; mientras que en los seres humanos, caninos domésticos, tigres y leones la pupila es circular. El

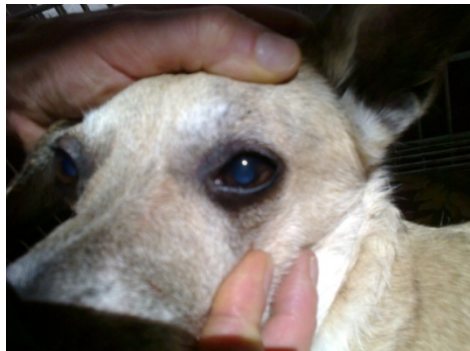


conocimiento de esta estructura y su función es fundamental debido a que la evaluación del *reflejo pupilar* forma parte del examen físico que se realiza en la Práctica Veterinaria.



*Figura 5.12: Felino de 6 años. Izq. Pupila en forma de hendidura vertical (miosis). Der. Pupila de contorno casi circular (midriasis).*

**Cristalino:** es la estructura elástica que permite la acomodación del ojo según la distancia a la que se encuentre el objeto. Es una lente biconvexa que está suspendida de los cuerpos ciliares mediante las fibras de la zónula de Zinn, separando la cámara anterior (que contiene el humor acuoso) de la cámara posterior (que contiene el humor vítreo). La elasticidad del cristalino se va reduciendo a medida que envejece el animal, esto genera un defecto de la visión que se denomina *presbicia*. Una afección muy frecuente del cristalino son las cataratas, que afectan tanto a humanos como animales, debido a la cual, esta estructura pierde su transparencia tornándose opaca, como puede verse en la Fig. 5.13.



*Figura 5.13: Canino mestizo de 12 años con catarata senil.*

**Coroides:** como mencionamos anteriormente, forma parte de la túnica vascular del ojo. Es una membrana delgada de color pardo que se ubica entre la esclerótica y la retina. Su porción anterior se continúa en el cuerpo ciliar, mientras que la posterior termina en el nervio óptico. Dentro de la coroides se encuentra el *tapetum lucidum*, que como mencionamos

anteriormente, es la estructura responsable del brillo característico de los ojos de la mayoría de los animales domésticos y silvestres, y está constituida por células reflectantes. Tiene la capacidad de reflejar la luz que incide sobre los ojos de algunos animales en condiciones de baja luminosidad (Figura 5.14). Su coloración varía en las distintas especies. No se encuentra en el cerdo ni en los humanos.



Figura 5.14: Felino de 2 años que muestra el brillo característico del tapetum lucidum.

**Humor acuoso:** es un líquido transparente similar al suero, pero con menor contenido de proteínas, que ocupa la cámara anterior del ojo. Aporta nutrientes a la córnea, que como dijimos anteriormente, es una estructura avascular.

**Cuerpo o Humor vítreo:** es una estructura redondeada y transparente que se ubica entre el cristalino y la retina. Está constituido por un 99% de agua, en la cual se encuentra disuelta una sustancia denominada hialuronano, y posee además colágeno, que mantiene la solución en estado de gel. Desde el punto de vista anatómico, asegura la fijación de las estructuras y mantiene la forma del globo ocular.

**Retina:** es una membrana nerviosa constituida por 10 capas histológicas de las cuales a los fines prácticos, describiremos las dos más externas (para más detalles consultar la bibliografía al final de este Capítulo). La capa más externa se denomina *epitelio pigmentario*, y una de sus funciones consiste en fagocitar los conos y bastones (células especializadas) que son eliminados continuamente. La otra función se relaciona con la formación de las imágenes. El pigmento (melanina) que posee este epitelio tiene la capacidad de absorber la luz, y de esta manera evita que los reflejos afecten la formación correcta de la imagen. Por debajo del epitelio pigmentario se encuentra la capa de fotorreceptores, constituida por células especializadas denominadas bastones y conos. Los bastones tienen mayor sensibilidad a la luz, por lo que su función es más importante cuando ésta es de baja intensidad (crepúsculo, amanecer); en tanto, la función de los conos cobra importancia cuando la luz es de alta intensidad, y para la visión de los colores. Estas células se caracterizan por contener moléculas de pigmentos sensibles a la luz.

Con respecto a las partes anatómicas de la retina, en la parte posterior podemos distinguir la mácula lútea, donde se encuentra la *fóvea central* (punto de mayor sensibilidad de la retina), y hay otra zona que es el punto ciego (papila), donde se origina el nervio óptico.

## Producción de la visión. Ojo normal o emétrope, miopía, hipermetropía y astigmatismo

Cuando los rayos luminosos provenientes del objeto atraviesan los diferentes medios ópticos del ojo experimentan sucesivas refracciones y finalmente la imagen se forma en la retina, que actúa como pantalla. Esta imagen es invertida, de menor tamaño y en dos dimensiones. Mediante un proceso químico, los fotorreceptores convierten la imagen en impulsos eléctricos que serán transmitidos por el nervio óptico a una región específica de la corteza cerebral. En consecuencia, no podemos decir que la visión consiste solamente en la recepción de la luz por el ojo, ya que la información captada por este órgano debe ser traducida a señales eléctricas y llegar al cerebro para hacerse consciente.

Para que un ojo sea emétrope (normal), se deben desarrollar todas las dimensiones del ojo de manera proporcionada, incluyendo las curvaturas de las lentes y los índices de refracción de los medios ópticos. La imagen que se forma en el ojo normal es real, invertida, y de menor tamaño (Figura 5.15).

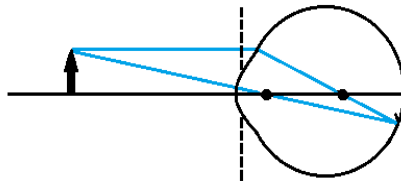


Figura 5.15: Producción de la visión en un ojo normal.

Si el ojo no tiene la capacidad de formar una imagen nítida en la retina, se produce lo que se conoce como *vicios de refracción*, y son los que se detallan a continuación.

Miopía: es un defecto de la visión en el cual no se ven con nitidez los objetos lejanos (Figura 5.16). Esto se debe a que el ojo se encuentra alargado en sentido longitudinal (mayor diámetro antero-posterior), de manera que el foco imagen se localiza por delante de la retina. Este defecto se logra corregir utilizando lentes divergentes (negativas), y así la imagen puede formarse en la retina.

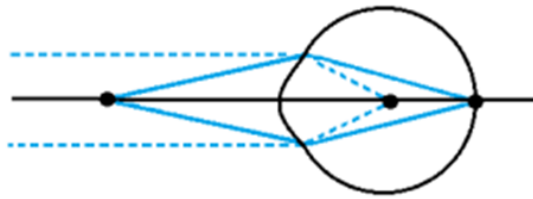


Figura 5.16: Producción de la visión en un ojo miope.

Hipermetropía: es el defecto contrario a la miopía, en el cual no pueden verse con nitidez los objetos cercanos (Figura 5.17). El ojo se encuentra aplanado en sentido longitudinal (menor diámetro antero-posterior) y en consecuencia el foco imagen se localiza detrás de la retina. Este defecto se corrige utilizando lentes convergentes (positivas), y así la imagen puede formarse en la retina.

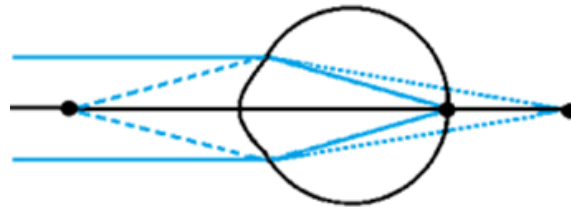


Figura 5.17: Producción de la visión en un ojo hipermetrope.

Astigmatismo: el defecto se localiza en la córnea, de manera que los rayos pertenecientes a los diferentes planos tienen su foco en distintos puntos del eje (Figura 5.18). En este caso no se formará una imagen nítida, no importa a que distancia se encuentre el objeto.

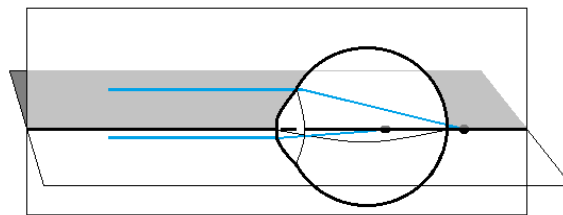


Figura 5.18: Marcha de los rayos en el astigmatismo.

Presbicia: es una condición que se debe a la disminución de la elasticidad del cristalino relacionada con el envejecimiento, de manera que con el tiempo se va perdiendo la capacidad de acomodación. Estos individuos ven bien los objetos lejanos, pero les cuesta ver con nitidez los objetos cercanos.

## El sonido

El sonido es una sensación, en el órgano del oído, producida por el movimiento ondulatorio en un medio elástico (normalmente el aire), debido a cambios rápidos de presión, generados por el movimiento vibratorio de un cuerpo sonoro. Físicamente, es una onda mecánica longitudinal que se propaga a través de un medio elástico (líquido, sólido o gaseoso). Es de vital importancia para todos los animales superiores, que tienen órganos especializados para detectar y producir estas ondas, ya que a partir del sonido los animales pueden comunicarse entre sí y obtener información del medio que los rodea.

La velocidad del sonido varía según las características del medio en el cual se propaga, dependiendo de la elasticidad y densidad del mismo, como se puede ver en la Tabla 5.2.

Por lo expuesto, para que exista el sonido deben estar presentes: 1) una fuente de vibración mecánica o fuente sonora, 2) un medio elástico a través del cual se propague la perturbación, es decir la onda sonora (sonido). Dicho medio puede ser gaseoso (por ejemplo, el aire), líquido (agua) o sólido (metales, hueso) y, 3), un receptor del sonido.

**Tabla 5.2: Velocidad del sonido en distintos medios materiales.**

Medio	Velocidad (15 °C)
Aire	340 m/s
Agua	1500 m/s
Músculo	1568 m/s
Hueso	3600 m/s

## Características o cualidades del sonido

El sonido se puede caracterizar mediante tres variables: a) intensidad, b) altura o tono y c) timbre.

- a) Intensidad: característica que permite clasificar el sonido en fuertes o débiles. Se mide en decibels (db). Depende de la amplitud del movimiento oscilatorio, de la frecuencia y de la densidad del medio.

b) Altura o tono: característica que permite clasificar a los sonidos en graves o agudos. Está relacionado con la frecuencia. Podemos decir que cuando la frecuencia es baja, el sonido es grave. Otra apreciación que podemos hacer con respecto al tono es que cuando este tiende a ser muy bajo, la intensidad del sonido se hace más alta, lo que lleva a deducir que las propiedades intensidad y tono son inversamente proporcionales.

c) Timbre: permite distinguir entre dos sonidos de igual altura pero provenientes de distintas fuentes, aun cuando tengan el mismo tono y la misma intensidad. Por ejemplo el Do de un violín y el de una flauta. Esta cualidad es característica de cada individuo.

## Anatomía y función del oído en los animales

Anatómicamente, el oído está dividido en tres partes: a) Oído externo, b) oído medio y c) oído interno.

**Oído externo:** está constituido por el pabellón auricular y el conducto auditivo externo (Fig. 5.19). La función general es de recoger y conducir los sonidos hacia el interior, hacia la membrana timpánica (tímpano). La forma y tamaño del pabellón auricular depende de cada especie. Esta estructura además protege del ingreso de cuerpos extraños y para ahuyentar insectos con sus movimientos.

**Oído medio:** esta porción del oído se encuentra excavado en el hueso temporal, en la caja timpánica, es una estructura llena de aire. Se relaciona con el oído externo a través de la membrana timpánica y con el oído interno por medio de dos aberturas pequeñas llamadas ventana oval y redonda. Además, se comunica con la faringe por la trompa de Eustaquio, estructura sensible a los cambios de presión. En dicha caja timpánica se encuentra una cadena de huesecillos articulados entre si llamados martillo, yunque y estribo, estos transfieren las vibraciones del tímpano hacia la ventana oval. Esta parte del oído tiene la particularidad de ser un poco más compleja que el oído externo dado que su función es de hacer los ajustes y transmitir en forma adecuada la onda sonora.

**Oído interno:** podemos decir que a medida que vamos yendo más adentro la estructura del oído se va haciendo más compleja. Esta porción está constituida por un laberinto óseo relleno de perilinfa, químicamente muy similar al LEC (Líquido extracelular). También encontramos a los canales semicirculares, al vestíbulo y a la cóclea o caracol. En sí, podemos decir que hay una zona auditiva y otra vestibular relacionada al equilibrio. Dentro de la cóclea está el llamado órgano de Corti, que en su interior contiene células sensoriales ciliadas, que actúan como

transductores de señales sonoras a impulsos nerviosos. Su estimulación inicia la sensación auditiva, al enviar los impulsos eléctricos a través del nervio auditivo hacia el cerebro.

El oído interno representa el final de la cadena de procesamiento mecánico del sonido, y en él se llevan a cabo tres funciones primordiales: filtraje de la señal sonora, transducción y generación de impulsos nerviosos.

## Mecanismo de la audición

La audición comienza en el oído externo, las ondas sonoras o vibraciones ingresan al conducto auditivo externo y golpean la membrana timpánica y la ponen en vibración, la cual transfiere esta presión a los tres pequeños huesos del oído medio hasta llegar a la ventana oval. Como la superficie de la membrana del tímpano es mucho mayor que la base del estribo, la presión que transmite el oído medio es mucho mayor que la que recibe (20 veces mayor aproximadamente). Esta multiplicación de la presión que mencionamos es adecuada para transmitir el sonido de un medio compresible como el aire en el oído medio a un medio líquido, prácticamente incompresible como el oído interno. La vibración del pie del estribo es transmitida por la ventana oval a la perilinfa originando movimientos que son transmitidos en el oído interno hasta llegar al órgano de corti donde las células ciliadas son flexionadas. Esta flexión es el último paso mecánico del proceso, a partir de aquí se generan potenciales de acción en las células ciliadas los cuales son enviados a través del nervio auditivo y captado por el cerebro, que los traduce en sonido.

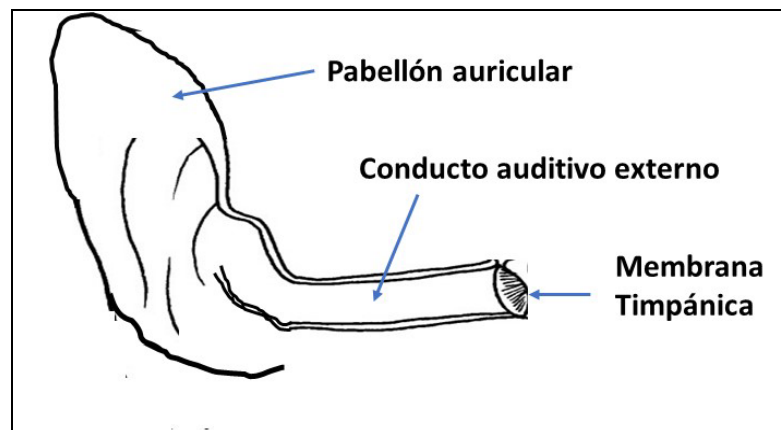


Figura 5.19: Esquema del oído externo.

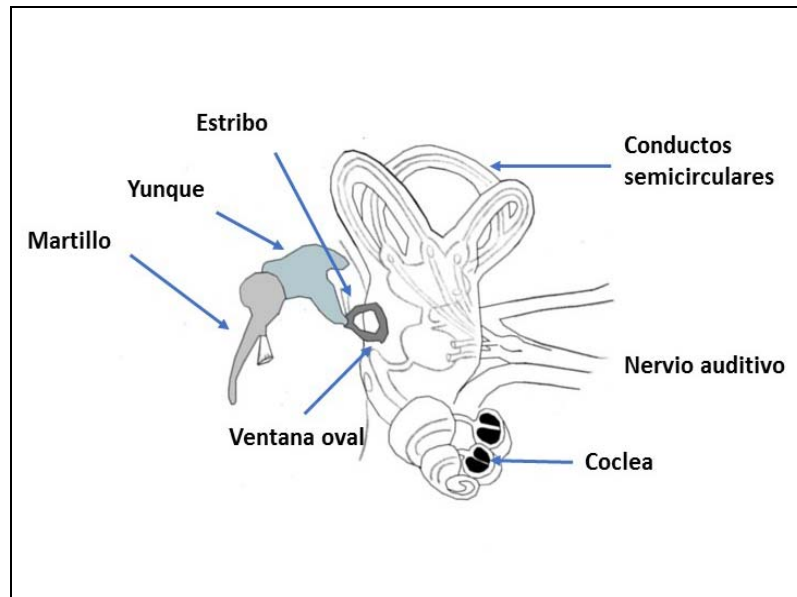


Figura 5.20: Esquema del oído medio e interno.

## Tipos de sonidos

El sonido se puede clasificar en función de la frecuencia de la onda en: *infrasonido*, frecuencias menores a 20 Hz, *sonido propiamente dicho o sónico*, abarca frecuencias entre 20 y 20000 Hz, estos valores son los perceptibles por el ser humano y ultrasonidos, comprende frecuencias mayores a 20000 Hz o 20 kHz. En la Tabla 5.3 se presentan los rangos de frecuencias perceptibles para diferentes animales.



**Tabla 5.3: Rangos de frecuencias perceptibles para diferentes animales.**

	<b>Rango de frecuencia (Hz)</b>
Canino	67-45000
Felino	45-64000
Equino	55-33500
Gallináceas	125-2000

## **Ultrasonografía**

La ultrasonografía es una técnica que utiliza ondas de alta frecuencia para obtener información de órganos internos y tejidos.

Las ondas de ultrasonido son emitidas por un transductor y viajan por el cuerpo hasta chocar con el límite entre los diferentes tejidos, parte de la onda es reflejada (ecos) y el resto sigue penetrando el cuerpo hasta chocar con otro límite. El transductor recibe las ondas reflejadas y a partir de la velocidad del sonido en el tejido (1540 m/s) y el tiempo que le tomó a la onda regresar, el equipo calcula la distancia del transductor al tejido. A partir de las distancias e intensidades de las ondas obtenidas se construye una imagen en 2D usando una escala de grises.

En si el transductor tiene la función de emisor de ondas de ultrasonido y receptor del eco.

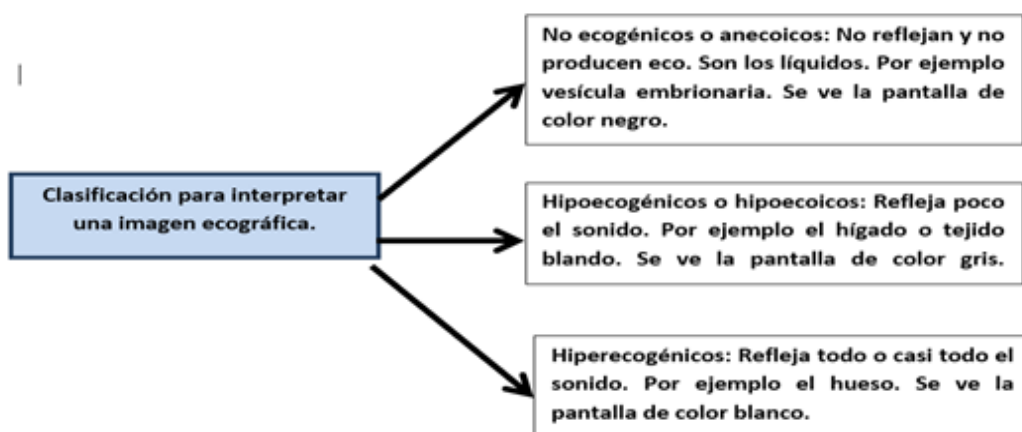
Este tipo de método de diagnóstico tiene mucha utilidad en la clínica veterinaria, es no invasivo, y no requiere mayores preparaciones, solo estar el animal en ayuno previo, de esta manera se podrá visualizar mejor la imagen del órgano o tejido que se quiere estudiar. Prosiguiendo con la técnica, se debe rasurar la zona en cuestión y colocar gel, que ayuda a que los ecos se transmitan mejor y así obtener imágenes más nítidas. Luego se coloca el transductor sobre la superficie del cuerpo y se mueve en distintos ángulos, para obtener varias vistas del elemento en estudio. Podemos decir que dentro de los usos para la veterinaria son diversos,

desde lesiones a nivel abdominal, cuerpos extraños, alteraciones en la micción (cálculos), alteración en la defecación, alteraciones cardíacas y gestación (para diagnosticarla y evaluar el estado de los fetos). En la Figura 5. 21 se muestra una fotografía de un ecógrafo portátil.



Figura 5.21: Imagen de un ecógrafo portátil.

En función de los tejidos estudiados mediante esta técnica podemos usar distintas terminologías para interpretar una imagen ecográfica:



En la Figura 5.22 se muestran a modo de ejemplo algunas imágenes obtenidas con el ecógrafo de vejiga y de riñón de canino.



Figura 5.22: Ejemplo de imágenes obtenidas en ecografías.

## Referencias

- Academia de Ciencias de la Región de Murcia (2003). El espectro electromagnético. Recuperado de <http://www.um.es/acc/el-espectro-electromagnetico/>
- Archivos de la Sociedad Española de Oftalmología. Vol 89, N° 12, 384-394. Recuperado de <http://www.elsevier.es/es-revista-archivos-sociedad-espanola-oftalmologia-296-articulo-la-forma-pupila-el-reino-S0365669114001452>
- Behar Rivero, D. S. (Octubre de 2017). Capítulo III Física de la visión. *Biofísica de las ciencias de la salud*. Recuperado de <http://rdigital.unicv.edu.cv/bitstream/123456789/110/1/Libro%20Biofísica%20ESTE.pdf>
- Bernades, J. M. (2009). El Tercer Párpado en perros y gatos. Recuperado de ¡Error! Referencia de hipervínculo no válida. [http://www.foyel.com/paginas/2009/05/544/el\\_tercer\\_parpado\\_en\\_perros\\_y\\_gatos/](http://www.foyel.com/paginas/2009/05/544/el_tercer_parpado_en_perros_y_gatos/)
- Cisale, H. (2011). Prólogo a la primera y segunda edición. En H. Cisale *Física biológica veterinaria (2da edición)* (pp. 9-12). Buenos Aires: Eudeba.
- Cisale, H. (2011). Capítulo Bioacústica. En H. Cisale, *Física biológica veterinaria (2da edición)* (pp 141-153). Buenos Aires: Eudeba.
- Dome, E. (Octubre de 2017) Radiofrecuencias y microondas. Recuperado de [www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/RadioyMicro.htm](http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/RadioyMicro.htm)
- Frumento, A. S. (1995). Capítulo 21 Óptica geométrica de la visión. En A.S. Frumento *Biofísica. (3ra edición)* (pp. 397-410). Madrid: Mosby / Doyma Libros.
- Frumento, A. S. (1995). Capítulo 22 Óptica física. En A.S. Frumento *Biofísica. (3ra edición)* (pp. 411-428). Madrid: Mosby / Doyma Libros.
- González Martín Moro, J.; Gómez Sanz, F.; Sales Sanz, A., Huguet Baudin, E.; Murube del Castillo, J. (Diciembre, 2014). La forma de la pupila en el reino animal: de la pseudopupila a la pupila vertical. Recuperado de <http://www.elsevier.es/pt-revista-archivos-sociedad-espanola-oftalmologia-296-articulo-la-forma-pupila-el-reino-S0365669114001452>
- Pariente Llanos J.A. (1995) Capítulo 9. Fisiología de la audición. En A. García Sacristán, *Fisiología Veterinaria (1era edición)* (pp. 132-141). Madrid, España: Editorial Mc Graw-Hill Interamericana de España.
- Parisi, M. (2001). Capítulo 6 Biofísica de los sentidos. Visión. En M. Parisi *Temas de biofísica. (1ra edición)* (pp. 107-125). Santiago, Chile: McGraw-Hill. Interamericana de Chile.
- Rodríguez Moratino A. (1995) Capítulo 8. Fotorrecepción, el ojo y la visión. En A. García Sacristán *Fisiología veterinaria (1era edición)* (pp. 114-131). Madrid, España: McGraw-Hill Interamericana de España.
- Wilson, J. D., Buffa, A. J., Lou, B. (2007). Capítulo 22. Reflexión y refracción de la luz. En J. D. Wilson, A. J. Buffa, B. Lou. *Física (6ª edición)* (pp. 705-728). México: Pearson Educación.

# CAPÍTULO 6

## Biofísica del aparato locomotor animal

*Francisco Pellegrino, Joaquín Bruzzo Lafratto*

### Introducción

En el organismo animal podemos encontrar los tres estados de agregación de la materia: *gaseoso*, en el aire que fluye por los alvéolos pulmonares; *líquido*, en la sangre que circula por los vasos sanguíneos; o *sólido*, presente en los huesos y músculos que constituyen el sistema músculo esquelético que da sostén, estabilidad y movimiento a los animales.

En este capítulo nos enfocaremos en el estado sólido, el cual se distingue de los otros dos estados por presentar forma y volumen definido. Esto se debe a la presencia de importantes fuerzas de atracción electromagnéticas entre las moléculas que lo conforman, como veremos más adelante, que hace que las mismas se encuentren muy próximas entre sí. Asimismo, dichas moléculas presentan posiciones fijas, lo que confiere a los cuerpos sólidos regularidad en su estructura interna y una rigidez característica. Sin embargo, vale resaltar que no es absolutamente rígido, pudiendo sufrir ligeras modificaciones tanto de forma como de volumen al ser sometido a fuerzas externas considerables.

A continuación, veremos sus principales características y propiedades, así como las fuerzas interiores y exteriores que las determinan.

### Algunas características de los cuerpos sólidos

#### Densidad

Como ya explicamos en el Capítulo I, la densidad es la relación entre la cantidad de masa de un cuerpo y el volumen que ocupa el mismo. En el caso de los materiales sólidos dependerá de la cantidad de átomos que estos contengan, que aportarán la masa, como también de la

separación que exista entre los mismos, lo que determinará el volumen final del material. Esta magnitud vectorial varía mínimamente ante cambios de temperatura y presión. Por ello, las densidades de los diferentes materiales se han establecido a 0°C y a 1 atmósfera de presión.

La excepción es el agua, cuya densidad fue determinada a 4°C siendo su valor de 1 g/cm<sup>3</sup>. En líneas generales, al producirse un aumento de la presión, la densidad también aumenta. En cuanto a su variación ante cambios de temperatura, al aumentar la misma la densidad disminuye (la presión debe permanecer constante).

## Dilatación

Cuando un cuerpo sólido es expuesto a una fuente de calor sufre un aumento en sus dimensiones debido a un aumento de su temperatura interna. Dicho proceso se conoce comúnmente como *dilatación* y ocurre porque el calor aumenta las vibraciones de los átomos y moléculas que conforman el sólido, haciendo que las mismas pasen a tomar posiciones más alejadas de las que tenían originalmente. En consecuencia, el cuerpo sólido se dilata en todas sus dimensiones (largo, ancho y alto), dando origen a dilataciones de tipo lineal, superficial y volumétrica.

**Dilatación lineal:** La variación se produce en el *largo* de un cuerpo, es decir, en su longitud (Fig. 6.1). Se dice que experimenta un aumento de unidad de longitud cuando su temperatura aumenta en 1°C.

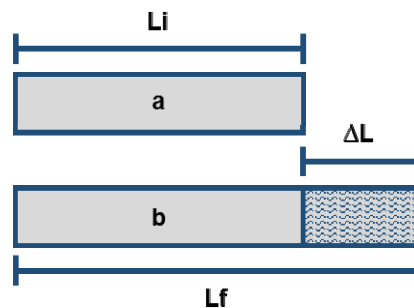


Fig. 6.1: Cuerpo sólido antes (a) y después (b) de ser expuesto a una fuente calórica.  
 $L_i$ : longitud inicial;  $L_f$ : longitud final;  $\Delta L$ : dilatación lineal (alargamiento).

**Dilatación superficial:** En este caso la variación se produce en dos dimensiones, largo y ancho (Fig. 6.2).

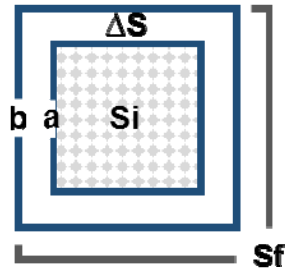


Fig. 6.2: Cuerpo sólido antes (a) y después (b) de ser expuesto a una fuente calórica.  
*Si: superficie inicial; Sf: superficie final;  $\Delta S$ : dilatación superficial.*

**Dilatación volumétrica:** El cuerpo sólido experimenta la variación en tres dimensiones, largo, ancho y alto (Fig. 6.3).

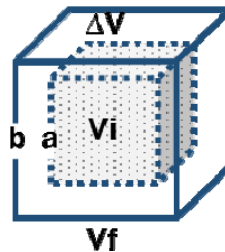


Fig. 6.3: Cuerpo sólido antes (a) y después (b) de ser expuesto a una fuente calórica.  
*Vi: volumen inicial; Vf: volumen final;  $\Delta V$ : dilatación volumétrica.*

### Calor específico

Se conoce como calor específico a la cantidad de calor que es necesaria agregar a un gramo de sustancia para elevar su temperatura en  $1^{\circ}\text{C}$ . El calor específico es característico de cada sustancia y su valor dependerá de la temperatura inicial de la misma. En cuanto a su unidad de medida, en el S.I. el calor específico se mide en Joule / kilogramo por grado Kelvin ( $\text{J}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{K}$ ); otra unidad utilizada frecuentemente es la caloría / gramo por grado centígrado ( $\text{cal}/\text{g}\cdot^{\circ}\text{C}$ ). En la siguiente tabla (Tabla 6.1) se expresan valores de calor específico correspondientes a algunas sustancias.

**Tabla 6.1: Calor específico de algunos materiales.**

Sustancia	Calor específico
Hierro	0,110
Plata	0,054
Hielo	0,460
Vidrio	0,170

*\*calor específico expresado en cal. g<sup>-1</sup>. °C<sup>-1</sup>*

### **Adhesión**

La adhesión es una propiedad de la materia donde ciertas sustancias al ser aplicadas unas contra otras se unen, formando un solo cuerpo. La adhesión puede darse entre superficies de un mismo material o de diferente, donde las mismas se mantendrán unidas gracias a las fuerzas intermoleculares. Un ejemplo claro de este proceso es la unión del cemento con el ladrillo.

Es importante destacar que las características finales de la adhesión formada dependerán de las superficies que entren en contacto, de la fuerza que se ejerza para unirlos y del tiempo que estas mismas tengan para actuar.

### **Difusión**

La difusión es un proceso que involucra el movimiento de átomos. Los átomos que conforman los gases, líquidos y sólidos se encuentran en constante movimiento, desplazándose a lo largo del tiempo. En los cuerpos sólidos, el proceso de difusión es más complejo que en los otros estados de la materia, debido a las uniones que mantienen a los átomos en posiciones fijas de equilibrio. Por ello, para que se produzca difusión de átomos en los cuerpos sólidos es necesario que exista una fuerza que impulse a los átomos a desplazarse, el calor. Ante un incremento de la temperatura se producirá lo que se conoce como vibración o agitación térmica, haciendo que los átomos de un sólido se desplacen.

El proceso de difusión en sólidos puede darse a través de dos mecanismos:

#### **1. Mecanismo de difusión por vacantes o sustitucional**

Los átomos se mueven de una posición a otra gracias a la presencia de vacantes (espacios vacíos disponibles) y de la energía que permite el desplazamiento, la cual es proporcionada por la vibración térmica de los átomos (Fig. 6.4). Así, la energía térmica será un factor clave, ya que



a medida que aumente la temperatura se producirán más vacantes y habrá más energía disponible para el desplazamiento de los átomos, siendo la velocidad de difusión proporcional a la misma.

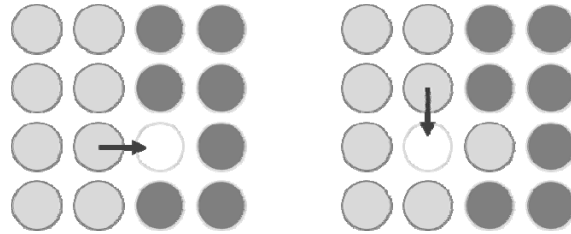


Fig. 6.4: Difusión de átomos por mecanismo de vacantes.

## 2. Mecanismo de difusión intersticial

En este caso, los átomos se desplazan desde una posición intersticial a otra cercana que esté desocupada. El tamaño de los átomos que difunden es pequeño comparado con los otros que también constituyen el cuerpo sólido (Fig. 6.5).

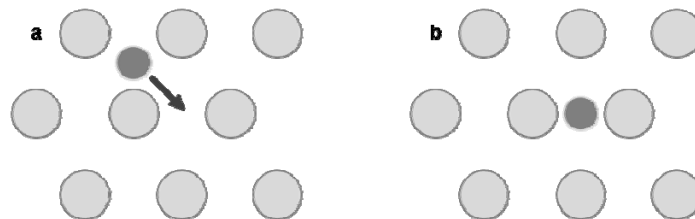


Fig. 6.5: Difusión de átomos por mecanismo intersticial. Posición antes (a) y después (b) de la difusión.

## Choque

Se conoce como choque a la colisión o impacto que se produce cuando un cuerpo que presenta una determinada masa ( $m_1$ ) y velocidad ( $v_1$ ) encuentra en su trayectoria otro cuerpo con otra masa ( $m_2$ ), el cual puede estar en reposo o hallarse dotado de una cierta velocidad ( $v_2$ ) (Fig. 6.6). El choque se caracteriza por ser de muy corta duración y porque entre ambos cuerpos existirá transmisión de energía, que será finalmente quien determinará las consecuencias del mismo.



Fig. 6.6. Choque entre dos sólidos en movimiento (a) y entre un sólido en movimiento y otro en reposo (b).

Podremos diferenciar entre dos tipos de choques dependiendo de si una vez producido el mismo, se conserva o no la energía cinética de los cuerpos. Así, tendremos *choques elásticos*, donde se conservará la energía cinética no produciéndose deformaciones permanentes en los cuerpos (comportamiento elástico) y, *choques inelásticos*, en los cuales sí se producirá una deformación permanente en uno o más de los cuerpos involucrados (comportamiento plástico).

En los animales, podremos ver las consecuencias internas y externas que produce el choque de un vehículo cuando atropella un perro o también, al producirse una fuerte caída que comúnmente origina fracturas en huesos largos como radio y cubito.

## Fuerzas interiores y exteriores

Los cuerpos sólidos están formados por moléculas que se encuentran unidas entre sí por fuerzas de origen electromagnético. Esto se debe a que cada una de las moléculas que compone un sólido se encuentra constituida por átomos, los cuales a su vez son un conjunto de cargas eléctricas positivas (protones) y negativas (electrones) responsables de dichas atracciones electromagnéticas.

Imaginemos en un cuerpo sólido dos moléculas próximas entre sí, las cuales se encuentran en posiciones fijas de equilibrio. En ellas, las fuerzas internas de atracción y repulsión están equilibradas, es decir, se compensan. Si por algún factor externo que actúe sobre el sólido comenzaran a separarse, las fuerzas internas de atracción tenderían a unir las. Por el contrario, si se aproximaran, las fuerzas internas de repulsión tenderían a separarlas con la finalidad de mantener la posición de equilibrio (Fig. 6.7).

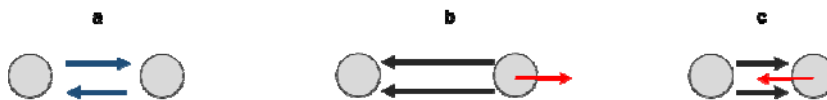


Fig. 6.7: Posición de equilibrio, fuerzas internas de atracción y repulsión compensadas (a). Predominio de fuerzas internas de atracción debido a fuerza externa que tiende a separar las moléculas (b). Predominio de fuerzas internas de repulsión debido a fuerza externa que tiende a aproximar las moléculas (c).

Ahora, imaginemos un resorte sostenido de un extremo sobre el cual colgamos una pesa del otro extremo. Observaremos que el resorte se alarga. Lo que está sucediendo es que sobre

el resorte está actuando una *fuerza deformante*, la pesa. Cuantas más pesas colguemos, más se alargará. Finalmente, si al quitar las pesas el resorte recupera su longitud inicial diremos que su comportamiento es elástico. Así, se define como *cuerpo elástico* aquél que tiene la capacidad de alterar su forma original al actuar sobre él una fuerza deformante, recuperando posteriormente su forma inicial cuando la fuerza deformante deja de actuar (Fig. 6.8).

Pero no todos los materiales son elásticos, no pudiendo recuperar su forma inicial luego de sufrir una deformación. Estos se denominan *cuerpos inelásticos*, como es el caso, por ejemplo, de la plastilina.

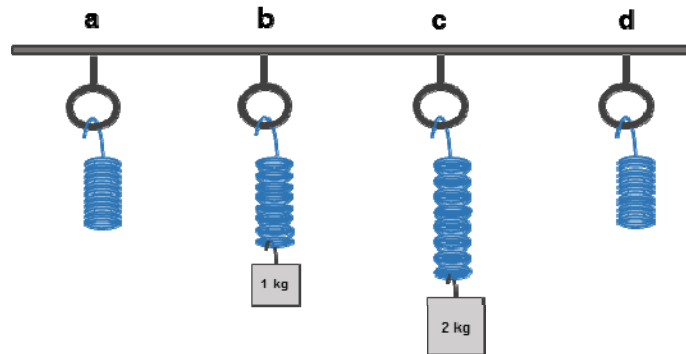


Fig. 6.8: Ejemplo de deformación elástica. Resorte sostenido desde un extremo (a) sobre el cual se colocan pesas desde el otro extremo produciendo alargamientos (b y c). Al quitar las pesas el resorte recupera su longitud original (d).

Cabe destacar que, si aplicamos una fuerza deformante a un material elástico más allá de cierto límite, no recuperará su forma original, permaneciendo deformado.

Es por ello que se han establecido dos límites:

- *Límite elástico*: distancia a partir de la cual se producirá una deformación permanente en el cuerpo deformado.
- *Módulo de ruptura*: distancia a partir de la cual se producirá la ruptura del cuerpo deformado.

De esta forma, todo cuerpo sobre el que actúe una fuerza deformante sin sobrepasar el límite elástico tendrá un *comportamiento elástico*, mientras que aquel que sobrepase el límite elástico sin llegar al módulo de ruptura tendrá un *comportamiento plástico* (Fig. 6.9).

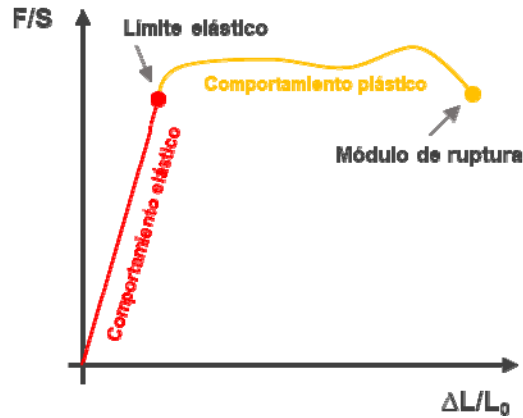


Fig. 6.9: Relación entre el esfuerzo realizado ( $F/S$ ) y la deformación producida ( $\Delta L/L_0$ ).

## Ley de Hooke

En comportamientos de tipo elástico se ha planteado una relación conocida como *Ley de Hooke*, en honor a quien la advirtió, el físico Robert Hooke. La misma sostiene que “*la fuerza externa aplicada es proporcional a la deformación producida*”. Esta ley será válida siempre y cuando la fuerza que actúe sobre el material no supere el límite elástico. Su fórmula es:

$$F = k \cdot \Delta L$$

Siendo,  $F$  la fuerza externa aplicada (en N o Dinás),  $k$  la constante elástica (en N/m o Dinás/cm) y  $\Delta L$  la variación de longitud (en m o cm) (diferencia entre la longitud final ( $L_f$ ) y la longitud inicial ( $L_0$ )).

## Tipos de deformaciones elásticas

### Elasticidad por tracción o tensión

La *tracción* es uno de los casos típicos de deformación elástica. Como ejemplo práctico se puede citar un alambre de acero, material elástico por excelencia. Al ser sometido a una fuerza deformante en dirección de su longitud principal, el alambre se alarga. En este caso, la relación entre fuerza y deformación se puede expresar de la siguiente forma:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{1 \cdot F}{E \cdot S}$$

*“La deformación por unidad de longitud es proporcional a la fuerza por unidad de superficie”*

Siendo:  $\Delta L$ : variación de longitud ( $L_f - L_0$ ) en m o cm;  $L$ : longitud original, en m o cm;  $F$ : fuerza aplicada, en N o Dinias;  $S$ : superficie, en  $m^2$  o  $cm^2$ ;  $E$ : módulo de Young, en  $N/m^2$  o  $Dinas/cm^2$ .

Asimismo, debemos aclarar que  $\Delta L/L_0$  se conoce como la deformación relativa ( $\epsilon$ ), siendo la razón de la variación de longitud ( $\Delta L$ ) a la longitud inicial ( $L_0$ ). Esta deformación propiamente dicha se refiere al cambio relativo en dimensiones o forma, de un cuerpo sometido a un *esfuerzo*. Este último, representado con letra sigma ( $\sigma$ ), es la relación entre la fuerza ( $F$ ) aplicada sobre un cuerpo y el área ( $A$ ) donde esta actúa:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

En el sistema M.K.S. y S.I. sus unidades son las siguientes:  $\sigma = N/m^2$ ;  $F = N$ ;  $A = m^2$

Por su parte, el módulo de Young ( $E$ ), es característico de cada material, siendo su valor dependiente de la composición del mismo. En líneas generales, cuanto mayor es el valor del módulo de Young menos deformable es el material.

A fines prácticos, el módulo de Young representa la fuerza necesaria para que un sólido cilíndrico de sección igual a la unidad, aumente su longitud al doble.

En la siguiente tabla (Tabla 6.2) podemos observar algunos valores de módulo de Young de diferentes sólidos sometidos a una fuerza de tracción.

**Tabla 6.2: Módulos de Young en sólidos biológicos ante un esfuerzo de tracción.**

	<b>Tracción</b>
<b>Material</b>	<b>Módulo de Young</b>
Fémur de caballo	$23,00 \times 10^9$
Fémur de avestruz	$12,60 \times 10^9$
Cartílago	$0,30 \times 10^9$
Cáscara de Huevo	$0,06 \times 10^9$

*\*módulo de Young expresado en  $N/m^2$*

## Elasticidad por compresión

La compresión es una deformación elástica similar a la tracción, donde las fuerzas deformantes actúan en la dirección de la dimensión principal del material (su eje longitudinal), pero en este caso tienden a producir un acortamiento del mismo. Un ejemplo clásico es el de las columnas, estructuras diseñadas para soportar fuerzas de compresión. Existe un fenómeno que puede ocurrir como consecuencias de dichas fuerzas conocido como *pandeo*, que diferencia a la tracción de la compresión, el cuál mencionaremos más adelante.

## Elasticidad por flexión

En este caso, la fuerza deformante tiende a actuar a lo largo del material provocando un alejamiento desde su punto de aplicación. La distancia entre la posición de equilibrio que posee previamente el material y la flexión generada por la fuerza deformante se conoce como *flecha de flexión*.

Podemos observar este tipo de elasticidad en una barra que se encuentra fija por un extremo, por ambos o simplemente apoyada desde los extremos, sobre la que actúan fuerzas deformantes que tienden a flexionarla.

Cuando se produce elasticidad por flexión en algún material, ocurren simultáneamente los fenómenos de tracción y compresión. Mientras los átomos que conforman la parte superior se alargan, los de la parte inferior se comprimen, o viceversa, dependiendo en qué parte actúe la fuerza deformante (Fig. 6.10 a y b).

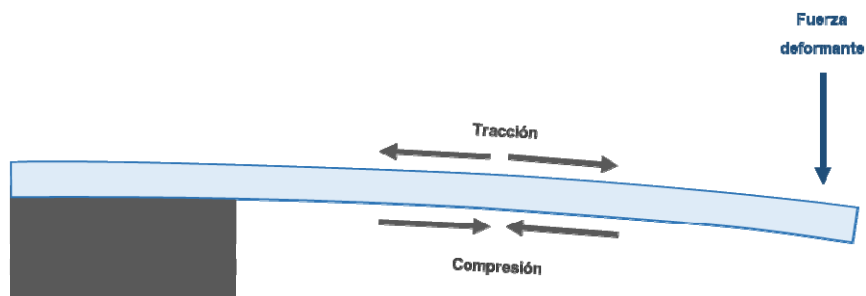


Fig. 6.10a: Trampolín sobre el que actúa una fuerza deformante en el extremo libre produciendo elasticidad por flexión. La parte superior del trampolín se alarga (tracción), mientras que la parte inferior se comprime (compresión).

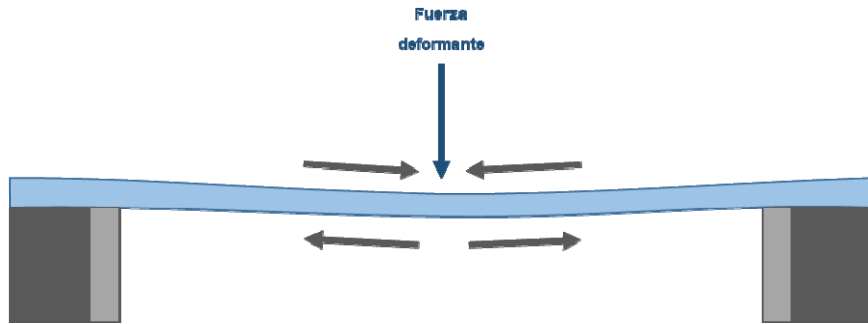


Fig. 6.10b: Tabla sostenida desde sus extremos sobre la que actúa una fuerza deformante en la parte media produciendo elasticidad por flexión. La parte superior se comprime (compresión), la inferior se alarga (tracción).

### Elasticidad por cizalladura

La elasticidad por cizalladura, también conocida como elasticidad transversal, es un tipo de deformación elástica producida por fuerzas que hacen que unas capas de material resbalen sobre otras. El esfuerzo tiende a cortar el material (esfuerzo cortante), debido a dos fuerzas opuestas que actúan sobre él (Fig. 6.11).

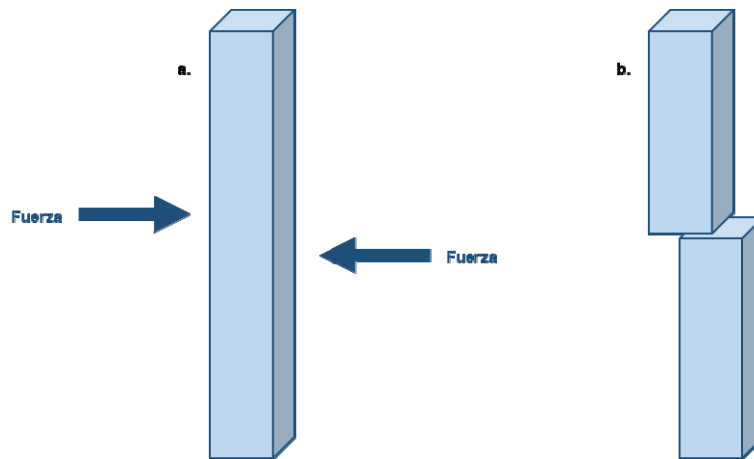


Fig. 6.11: Barra sobre la que actúan dos fuerzas opuestas (a) produciendo una deformación por cizalladura (b).

## Elasticidad por torsión

La elasticidad por torsión es un ejemplo típico de cizalladura, en el cual unos planos de material resbalan sobre otros. Por ejemplo, en el caso de una barra que se encuentra sujeta por un extremo, si es sometida por el otro extremo a un par de fuerzas que actúen en sentido opuesto, se tuerce (Fig. 6.12).

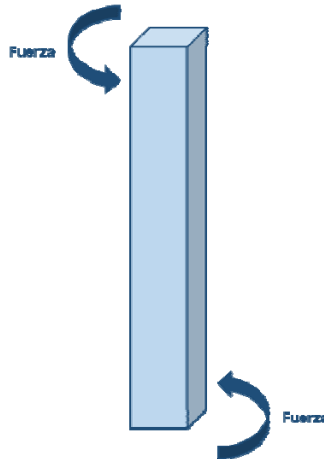


Fig. 6.12. Barra sobre la que actúan dos fuerzas opuestas produciendo una deformación por torsión.

## Propiedades de los cuerpos sólidos

Los valores del módulo de Young, del límite de elasticidad y del módulo de ruptura de cada material determinan las propiedades de plasticidad, ductilidad, maleabilidad, fragilidad, tenacidad y dureza. A continuación, definimos cada una de ellas.

### Plasticidad

Una *deformación plástica* es aquella que no desaparece una vez que la fuerza deformante deja de actuar, es decir, es irreversible. La fuerza deformante supera el límite de elasticidad del material produciendo una deformación permanente. Es importante señalar que la plasticidad de los materiales está dada por su capacidad de poder deformarse permanentemente, pero sin llegar a romperse. De esta forma, para un material plástico los valores del módulo de Young y del límite de elasticidad son muy pequeños. Un ejemplo típico de material plástico es la plastilina.



## **Ductilidad**

Es una propiedad de algunos materiales que son capaces de admitir importantes deformaciones de tipo plástica y sostenida, sin llegar a romperse. Una característica típica de estos materiales es que ante la acción de una fuerza de tensión longitudinal pueden extenderse formando fibras o hilos. Vale destacar que, esto no significa que no puedan romperse, si no que lo harán luego de sufrir evidentes deformaciones. En los materiales dúctiles, el módulo de Young y el límite de elasticidad no son muy grandes, pero su módulo de ruptura es muy superior a su límite elástico, permitiendo tales deformaciones. Como ejemplos se pueden mencionar a metales como el hierro, cobre y zinc, a la madera, entre otros.

## **Maleabilidad**

Propiedad que presentan aquellos materiales que se pueden trabajar fácilmente, pudiendo deformarse notoriamente sin romperse. A diferencia de los materiales dúctiles, los maleables permiten la formación de delgadas láminas. En ellos, el módulo de Young y el límite de elasticidad necesariamente deben ser pequeños con respecto al módulo de ruptura.

Uno de los metales más maleables es el aluminio, pensemos en las finas láminas de papel aluminio que se utilizan para conservar y cocinar alimentos. Otros ejemplos son oro, plata, cobre.

## **Fragilidad**

Es la propiedad que presentan ciertos materiales que se rompen ante la menor deformación, originando partes de menor tamaño. Así, un material frágil presenta escasa o nula elasticidad, siendo incapaces de recuperar su forma una vez sufrido un esfuerzo. Los valores del límite de elasticidad y módulo de ruptura se encuentran muy próximos. Ejemplos típicos de materiales frágiles son el vidrio, la cerámica, el ladrillo, el diamante.

## **Tenacidad**

Es la capacidad que tienen los materiales para absorber simultáneamente esfuerzos y deformaciones de consideración sin llegar a la ruptura. La tenacidad está asociada a la resistencia, a la energía que los materiales son capaces de absorber sin romperse. Es una propiedad que depende de la constitución de los materiales, de su estructura molecular y de las fuerzas de atracción entre sus moléculas. En estos materiales, los valores del módulo de

Young, límite de elasticidad y módulo de ruptura son muy grandes. Como ejemplos tenemos el cobre, acero, caliza, hormigón armado.

## **Dureza**

Representa la resistencia que ofrece la superficie de los materiales a ser rayados. Es una propiedad física que se encuentra directamente relacionada a la fuerza de unión de las moléculas que componen el material en cuestión.

En mineralogía, esta propiedad se expresa en forma relativa mediante una escala ideada por Friedrich Mohs, conocida como *escala de Mohs*, que va del 1 al 10. Está formada por una serie de minerales de dureza creciente donde cada término de esta escala es rayado por el siguiente y raya al anterior. El número 1 corresponde al talco y el 10 al diamante, siendo los valores intermedios pertenecientes al yeso, calcita, fluorita, apatita, feldespato, cuarzo, topacio y corindón. En el caso particular del diamante, mineral más duro que se conoce, sólo podría ser rayado por otro diamante. Sin embargo, a pesar de su gran dureza, es extremadamente frágil.

## **Materiales poco deformables (huesos) y muy deformables (músculo)**

A nivel orgánico encontramos principalmente dos tipos de materiales sólidos. Los sólidos poco deformables, tal el caso de los huesos y aquellos que, sin perder sus propiedades elásticas, sufren una gran deformación cuando actúan sobre ellos determinadas fuerzas externas (los músculos).

Los huesos se caracterizan por presentar un elevado módulo de Young siendo por tanto poco deformables, resistentes a la fractura y, generalmente, de poco peso.

Analizaremos principalmente a los huesos largos, los cuales pueden ser comparados con "columnas". Si sobre ellas actúan fuerzas centradas de compresión, no se produciría ninguna alteración, pudiendo ser estas fuerzas absorbidas por el material. Pero, si se aplican sobre los extremos, fuerzas de compresión no centradas, se produce lo que se conoce como "*fenómeno de Pandeo*". Este fenómeno consiste en la flexión lateral (pandeo) de la columna, pudiendo llegar a la ruptura por flexión. Además, este fenómeno tiende a ser auto progresivo, ya que la forma resultante luego de un ligero pandeo, será menos resistente que la original. Si no desaparecen las fuerzas externas, el proceso prosigue en general sin interrupción, hasta la destrucción de la columna.

El fenómeno de pandeo puede evitarse o disminuirse colocando en los extremos de las columnas, expansiones. En los huesos largos, estas expansiones se conocen con el nombre de *epifisis* (una en proximal y otra en distal), unidas a una columna central de hueso llamada

*diáfisis*. La zona central de la diáfisis es, en realidad, un tubo de material óseo resistente que rodea y protege a la médula, favoreciendo a conseguir la igualdad de peso y la máxima resistencia a la flexión (Fig. 6.13).



Fig. 6.13: Ubicación de las epifisis y diáfisis en un hueso largo (fémur de equino).

El tejido óseo se caracteriza por ser un tejido duro y se lo puede clasificar en:

- *Tejido óseo compacto*: tejido muy denso, que se encuentra en la periferia del hueso.
- *Tejido óseo esponjoso*: tejido menos denso que el compacto, que se encuentra en el centro del hueso y está formado por finas laminillas óseas que limitan pequeños espacios, por lo que se lo compara con las celdillas de una esponja (Fig. 6.14).

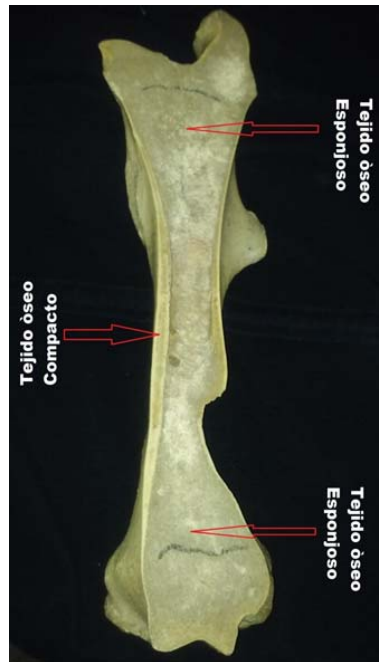


Fig. 6.14: Distribución del tejido óseo compacto y esponjoso en un hueso largo (fémur de equino).

Como dijimos anteriormente, los músculos son el ejemplo típico de materiales sólidos elásticos muy deformables. Gracias a la deformación que experimentan y a la fuerza que ejercen sobre los huesos al contraerse, permiten entre otras cosas el movimiento y desplazamiento de los seres vivos.

El tejido muscular puede ser de dos tipos: muscular estriado y muscular liso. En el primero encontramos, a su vez, el muscular estriado esquelético y el cardíaco.

El músculo estriado esquelético es el músculo más abundante del organismo animal. En los caninos, por ejemplo, la masa muscular representa una importante proporción del peso corporal total, pudiendo alcanzar en la raza galgo hasta un 60%. El tejido muscular está formado por células conocidas comúnmente como fibras musculares, las cuales presentan en su interior una matriz celular denominada sarcoplasma, en la que se encuentran importantes cantidades de iones potasio, magnesio y fosfato, mitocondrias y un extenso retículo sarcoplasmático. Asimismo, el líquido del sarcoplasma sirve de sustento a la gran cantidad de miofibrillas, estructuras contráctiles formadas por filamentos de actina y miosina, determinantes en el proceso de contracción muscular y en brindar al músculo esquelético su aspecto estriado característico, visible microscópicamente.

## Filamentos de actina y miosina

En la Figura 6.15 se representa esquemáticamente la organización del músculo estriado esquelético que detallaremos a continuación.

En las miofibrillas, los filamentos de actina y miosina se encuentran dispuestos intercaladamente, lo que determina que éstas posean bandas claras y oscuras.

- Las bandas claras se denominan *bandas I* y están formadas solamente por los filamentos de actina. Estas bandas contienen en su parte media el denominado *disco o línea Z*, desde el cual los filamentos de actina se proyectan en ambas direcciones para intercalarse con los filamentos de miosina.
- Las bandas oscuras se denominan *bandas A* y están formadas por los filamentos de miosina y por los extremos de los filamentos de actina donde éstos se intercalan con los de miosina. Las *bandas A* contienen en su parte media a las *bandas H*, formadas en estado de reposo solamente por los filamentos de miosina.

De esta manera, entre dos *discos Z* sucesivos quedará delimitada la unidad funcional del músculo estriado esquelético denominada *sarcómero*, que abarcará una *banda A* y dos *semibandas I*.

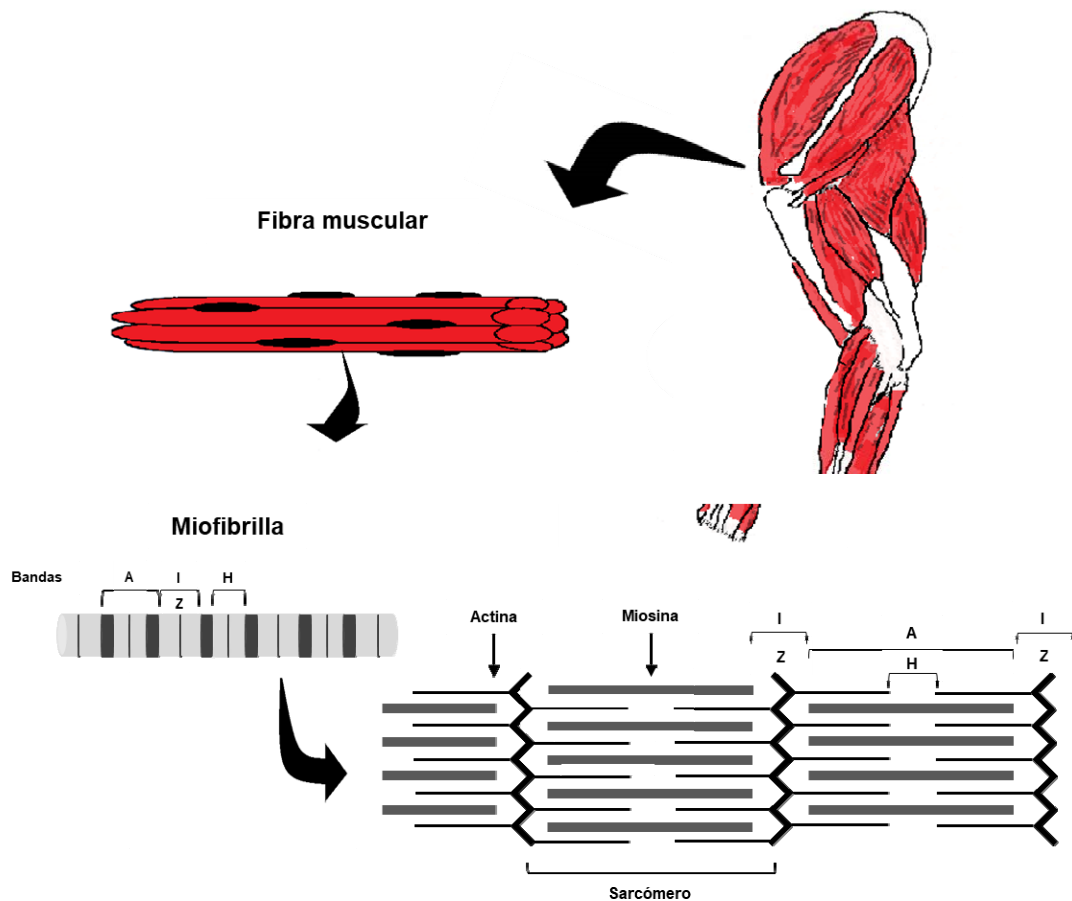


Fig. 6.15: Organización del músculo estriado esquelético. Descripción detallada en el texto.

## Biofísica de la contracción muscular

La contracción del músculo esquelético es un proceso caracterizado por un acortamiento de la longitud muscular, por el desarrollo de una fuerza de tracción (tensión) muscular, o por la combinación de ambos. A continuación, describiremos el mecanismo de la contracción con la intención de proporcionar las bases generales del proceso.

1. En primer lugar, como todo tejido excitable del organismo es necesaria la llegada de un potencial de acción que estimule a las fibras musculares a contraerse. Esto es posible gracias a la presencia de nervios motores capaces de transmitir el impulso nervioso hasta sus terminaciones en las fibras musculares.
2. En cada terminación nerviosa se libera una sustancia neurotransmisora conocida como *acetilcolina*, que actúa localmente sobre la membrana de la fibra muscular produciendo la apertura de canales de sodio. Luego de ello, los iones sodio presentes en el exterior de la fibra muscular ingresan masivamente al interior de la misma originando un potencial de acción que se extenderá a lo largo de toda la membrana celular.

3. De esta manera, el potencial de acción generado produce la despolarización de toda la membrana de la fibra muscular. También, gran parte del potencial llegará al interior de la fibra, produciendo la liberación de grandes cantidades de iones calcio desde el retículo sarcoplasmático.
4. Los iones calcio liberados inician el proceso de atracción entre los filamentos de actina y miosina, los cuales por un mecanismo de deslizamiento producirán la contracción muscular.
5. Finalmente, luego de transcurrida una fracción de segundo, los iones calcio son nuevamente transportados al interior del retículo sarcoplasmático mediante una bomba de calcio presente en la membrana del mismo. Allí esperarán almacenados hasta la llegada de un nuevo potencial de acción

### Tipos de contracción muscular

El músculo estriado esquelético puede responder a dos tipos de contracciones:

- *Isométrica*. Este tipo de contracción se produce cuando un músculo se contrae, pero manteniendo constante su longitud, es decir, sin acortamiento. Al producirse la contracción, su longitud no varía, sólo cambia su tensión. Un ejemplo sería cuando se intenta desplazar algún objeto. En este caso, el músculo está realizando una fuerza que intenta ser capaz de superar la resistencia que ejerce el objeto (Fig. 6.16).
- *Isotónica*. En este caso el músculo al contraerse cambia su longitud, pero manteniendo constante la fuerza (tensión) que ejerce durante toda la contracción. Un ejemplo sería el levantamiento de un peso. La tensión que el músculo produce al entrar en actividad es suficiente para elevar la carga que se le opone, entonces el músculo se acorta (Fig. 6.17).

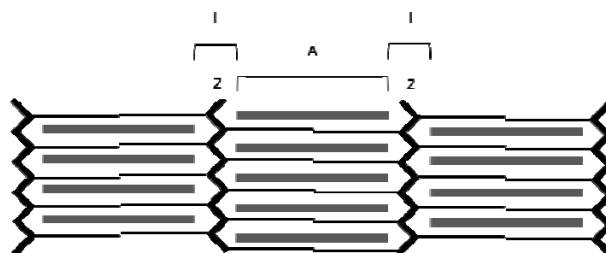


Fig. 6.16: Contracción isométrica. Los filamentos de actina y miosina se tensionan sin producirse acortamiento del sarcómero.

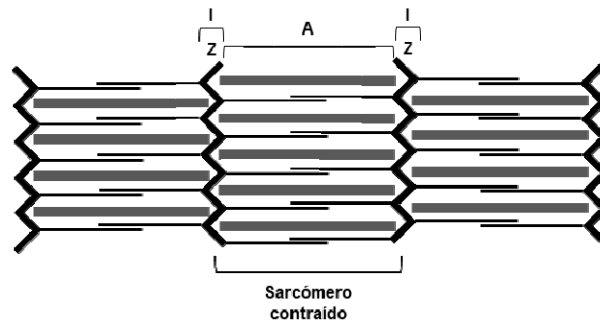


Fig. 6.17: Contracción isotónica. Acortamiento del sarcómero por deslizamiento de los filamentos de actina (negros) por sobre los de miosina (grises).

## Biomecánica del cuerpo rígido

### Biomecánica: conceptos y definiciones

La Biomecánica es la ciencia que estudia las fuerzas y aceleraciones que actúan sobre las estructuras y órganos de los seres vivos.

En el organismo animal se puede observar un movimiento de tipo mecánico, que consiste en el cambio de posición que experimenta el cuerpo, tomando como punto de referencia ya sea su posición inicial o a otros cuerpos. De allí que, la Biomecánica estudia el trabajo mecánico que realizan los animales mediante la dinámica y estática del cuerpo.

Se divide en *Bioestática* y *Biodinámica*.

- *Bioestática*: Estudia las fuerzas que actúan sobre los seres vivos, en estado de reposo o movimiento rectilíneo uniforme (movimiento en línea recta con velocidad constante). Por ejemplo: el estudio de las fuerzas que actúan cuando un caballo se encuentra de pie.
- *Biodinámica*: Estudia las condiciones y consecuencias de los cambios y movimientos que experimentan los cuerpos. A su vez, se subdivide en:
  - *Biocinética*: Analiza los cambios causados en el movimiento y las fuerzas necesarias para producir esos cambios. Estudia la causa del movimiento, ocupándose de las fuerzas, aceleraciones, la energía y el trabajo. Por ejemplo: el estudio de las fuerzas que actúan en los miembros de un perro mientras corre.
  - *Biocinemática*: Analiza los movimientos, pero sin considerar las fuerzas necesarias para producirlos. Es decir, estudia los cambios de posición que experimentan las diferentes partes del cuerpo en el espacio durante un tiempo determinado. Los movimientos se describen de manera cuantitativa por variables de tipo lineales y



angulares, relacionadas con el tiempo, desplazamiento, velocidad y aceleración. Por ejemplo: el estudio de los movimientos de los miembros del caballo durante el galope.

## **Inercia**

La inercia es una propiedad fundamental de la materia. Toma su origen en la Primera ley de Newton, conocida como *Ley de inercia* o *Principio de inercia*, que afirma que “Todo cuerpo persiste en un estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme a menos que sea obligado a cambiar su estado por fuerzas aplicadas sobre él”. Es decir que, para que un cuerpo inicie o modifique un movimiento es necesario que adquiera una aceleración, por lo que necesitará que una fuerza externa o una serie de fuerzas cuya resultante no sea cero, sea aplicada sobre él. Por lo tanto, en ausencia de una fuerza, los cuerpos en reposo seguirán estando en reposo y los cuerpos en movimiento se mantendrán en movimiento. Vale aclarar el término *fuerza resultante*, que se refiere al conjunto de todas las fuerzas que actúan sobre un cuerpo y que serán responsables de vencer el estado de inercia, siempre y cuando la resultante sea diferente de cero.

Un factor determinante de la cantidad de inercia de un cuerpo es su masa. Así, cuanto más masa tenga el cuerpo mayor será la inercia del mismo, por lo que será necesario una mayor fuerza para cambiar su estado de reposo o movimiento rectilíneo uniforme.

## **Equilibrio**

El equilibrio es la situación en la que un cuerpo conserva su estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme, debido a que las fuerzas que actúan sobre él se compensan y anulan mutuamente.

### **Equilibrio mecánico**

Se dice que varias fuerzas se equilibran o están en equilibrio cuando mutuamente anulan sus efectos. La resultante de las fuerzas que se equilibran es nula, es decir cero. De esta forma, el cuerpo estará en estado de equilibrio (Fig. 6.18).

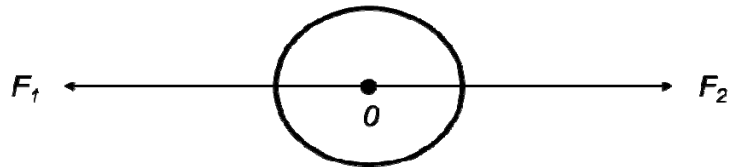


Figura 6.18: Cuerpo circular sobre el que actúan dos fuerzas de igual magnitud en sentido contrario ( $F_1$  y  $F_2$ ), por lo que mantienen el equilibrio en el punto 0.

En otras palabras, decimos que un cuerpo está en equilibrio mecánico cuando ofrece resistencia sobre otro cuerpo, que es al que se le ha aplicado una fuerza. Esto viene dado por la Tercera ley de Newton que sostiene que “cuando un cuerpo ejerce una fuerza sobre otro cuerpo, el segundo ejerce sobre el primero una fuerza igual y en sentido contrario”, denominada *fuerza normal*. Por ejemplo: cuando un perro se encuentra de pie empuja la tierra hacia abajo y es empujado al mismo tiempo hacia arriba por la tierra. Es el principio de acción y reacción, donde ambas fuerzas tendrán la misma intensidad, pero dirección opuesta (Fig.6.19).

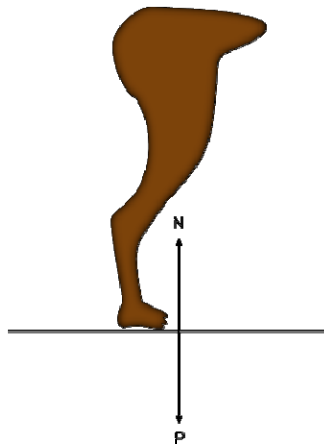


Figura 6.19: Principio de acción y reacción. El peso del animal ( $P$ ) es contrarrestado por la normal ( $N$ ).

### Centro de gravedad

El *centro de gravedad* de un cuerpo también llamado *centro de masa*, es el punto ubicado en la posición promedio de distribución del peso de ese cuerpo. Asimismo, se puede considerar como el punto de un cuerpo donde actúa, en su totalidad, la fuerza de la gravedad. En los cuerpos simétricos coincide con su centro geométrico, como es en el caso de una pelota de tenis (Fig.6.20).



*Fig. 6.20: Ubicación del centro de masa en una pelota de tenis.*

Pero si el cuerpo no es simétrico se debe determinar la ubicación del centro de gravedad, ya que la posición del mismo varía según el cambio de forma que experimente ese cuerpo. Por ejemplo, en los humanos el centro de gravedad tendrá diferente ubicación dependiendo de la posición en que se encuentre la persona. Consideremos los siguientes dos casos:

- Persona de pie y derecha. El centro de gravedad se ubicará a nivel de la 2da vértebra sacra sobre una línea vertical imaginaria que se extiende hasta el suelo y cae justo 3 cm por delante del tobillo.
- Persona con los brazos levantados sobre su cabeza. En este caso estará ubicado varios cm por encima de la 2da vértebra sacra.

Esta capacidad que posee el centro de gravedad para variar de posición será de gran importancia para que la persona conserve el equilibrio al estar de pie, caminar, correr o realizar cualquier tipo de actividad deportiva.

Por otro parte, distinto es en el caso de un objeto que se encuentra colgado. Por ejemplo, cuando se suspende una media res desde el corvejón, el centro de gravedad estará debajo del mismo. Para localizarlo es necesario trazar una vertical desde el punto de suspensión y el centro se ubicará en algún lugar a lo largo de esa línea.

### **Condición de estabilidad**

El centro de gravedad es el punto de equilibrio de un cuerpo, siendo la ubicación del mismo importante para la estabilidad. Si se traza una vertical hacia abajo desde el centro de gravedad de un cuerpo y cae dentro de su base, el objeto estará en equilibrio estable. Si cae fuera de la base será inestable. De allí la importancia del tamaño de la base, también llamada apoyo. Así, un cuerpo para estar en equilibrio necesita que su centro de gravedad esté en la línea recta

vertical que pasa por algún punto dentro del área de apoyo. El área de apoyo de una persona viene dada por la posición de los pies. En los animales cuadrúpedos, como los caninos o felinos, el área de apoyo se halla entre las 4 patas, lo que hace que el animal posea una gran condición de estabilidad. En el caso de las aves, contrariamente a lo que sucede en el hombre, el centro de gravedad se ubica debajo de sus caderas.

### **El centro de gravedad en los animales**

En los animales, el estado de equilibrio necesariamente implica que las fuerzas que actúan sobre el cuerpo se distribuyan de manera uniforme. Las cargas de los cinturones (torácico y pélvico) y miembros se aplican a través de los mecanismos de suspensión torácico y pelviano. Estos últimos, permiten a los músculos de las extremidades sostener el cuerpo del animal con mínimo esfuerzo, estabilizando a las mismas para mantener una posición erguida. Así, un caballo puede descansar o incluso dormir estando de pie.

En los animales cuadrúpedos, la constitución del organismo responde al concepto de arco y cuerda. Según ello, la parte encargada de sostener el peso del cuerpo está suspendida por sus extremos mediante un arco conformado por las vértebras dorso-lumbares, sus ligamentos y los músculos espinales, mientras que la cuerda tensora del arco está formada por el esternón, la línea media, los músculos hipoaxiales, grupo psoas y abdominales. Mediante esta disposición se logra que las cargas de tracción, tensión y presión se equilibren en el arco, evitando que todas las cargas recaigan sobre las extremidades.

La distribución de las cargas sobre los miembros está relacionada en primer lugar con la localización del centro gravedad. La localización de dicho centro tiene su sostén en el tipo de soporte que tiene el animal. Por lo general, se dice que el 60% del peso corporal corresponde a la *parte anterior* y el 40% restante a la *parte posterior*, aproximadamente. Por ejemplo: en un caballo en estación, que se encuentra apoyando sus cuatro miembros, el centro de gravedad se ubica justo por debajo de una línea imaginaria trazada entre el tubérculo mayor del húmero y la tuberosidad isquiática, a la altura de la 14<sup>ta</sup> costilla.

En la Figura 6.21, los puntos A, B, C, D representan los puntos de contacto entre los pies y el suelo, en una vaca vista desde arriba. Si el centro de gravedad (M) se localiza dentro de ABE, el animal puede bien dejar su pata trasera derecha o izquierda levantadas ya que en ambos casos el tronco está soportado por los pies A, B y C o A, B, y D. Ya que el centro de gravedad cae dentro de dos triángulos en ambos casos. Si el centro de gravedad está dentro del triángulo CDE, el animal puede levantar el miembro anterior izquierdo o el derecho ya que en ambos casos el centro de gravedad estará localizado dentro de BCD o ACD.

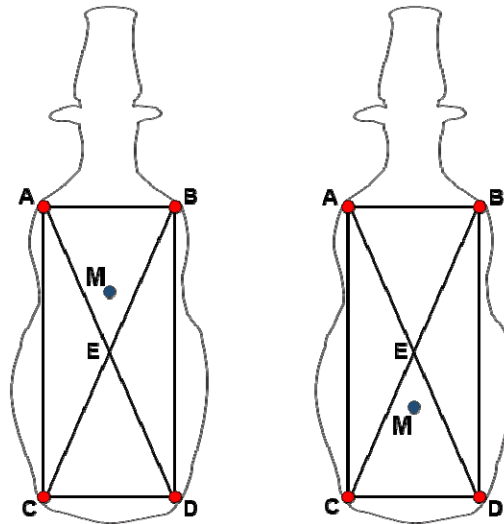


Figura 6.21: Distribución de las cargas sobre los miembros en una vaca según la localización del centro de gravedad. La descripción se detalla en el texto.

## Palancas del organismo animal

Por definición, una palanca es una barra rígida que oscila sobre un punto de apoyo denominado *fulcro* debido a la acción de dos fuerzas contrapuestas, la *fuerza potente* y la *fuerza resistente*.

A continuación, se detallan los elementos de una palanca:

- Fp: Fuerza potente, también llamada fuerza motriz o potencia. Corresponde a la fuerza que aplicamos de forma voluntaria con la finalidad de conseguir un resultado.
- Fr: Fuerza resistente, también fuerza de carga o resistencia. Es la fuerza a vencer. Es ejercida sobre la palanca, por el cuerpo a mover.
- Bp: Brazo potente, corresponde a la distancia entre la potencia y el fulcro.
- Br: Brazo resistente, distancia entre la resistencia y el fulcro.
- F: Fulcro, punto de apoyo o eje.

A partir de la ubicación de los diferentes elementos, se pueden encontrar 3 géneros o tipos de palanca:

- Palanca de *Primer género* o *interfija*. El punto de apoyo se encuentra ubicado entre la potencia y la resistencia. De esta forma, si se empuja hacia abajo en un extremo de la palanca se levanta una carga en el otro. Ejemplos de este tipo de palancas son la

tijera, el alicate, la tenaza, el “sube y baja”. En el organismo podemos encontrar esta palanca al levantar la cabeza. Allí, la articulación atlanto-occipital actúa como punto de apoyo, el peso de la cabeza como resistencia y la contracción de los músculos del cuello como fuerza potente (Fig. 6.22).

- Palanca de *Segundo género* o *interresistente*. Aquí la resistencia se encuentra ubicada entre la potencia y el punto de apoyo. De esta manera, para levantar una carga se debe levantar el extremo de la palanca. Como ejemplos se pueden citar la carretilla, el cascanueces, el destapador de botellas. En las personas se puede ver este tipo de palanca en la articulación tibiotarsiana, donde la articulación actúa como punto de apoyo, el peso del cuerpo como resistencia y los músculos extensores de tarso como potencia (Fig. 6.23).
- Palanca de *Tercer género* o *interpotente*. La potencia se encuentra entre la resistencia y el punto de apoyo. Así, la fuerza potente es aplicada en un punto intermedio. Algunos ejemplos son la caña de pescar, el martillo, la pinza de depilar. En los animales tendremos este tipo de palanca en los miembros, como veremos a continuación (Fig.6.24).

En los animales, el mecanismo de palanca es la forma general para realizar cualquier tipo de movimiento músculo esquelético. A nivel de los miembros el tipo de palanca es la *interpotente*, siendo frecuentemente utilizada para calcular los esfuerzos que el animal aplica al caminar.

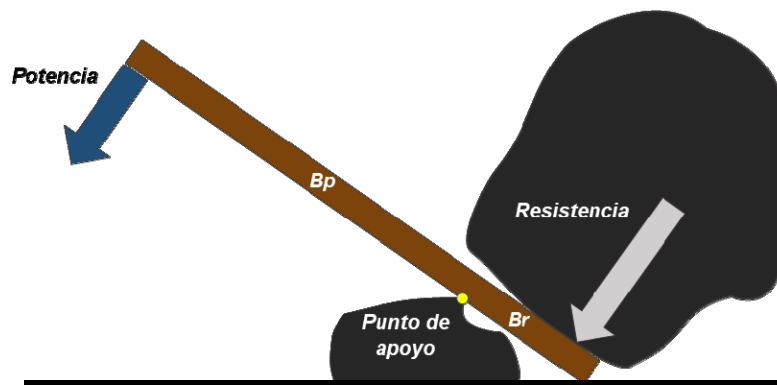


Figura 6.22: Palanca de primer género o interfiija para el movimiento de un objeto de gran peso.  
Descripción en el texto.

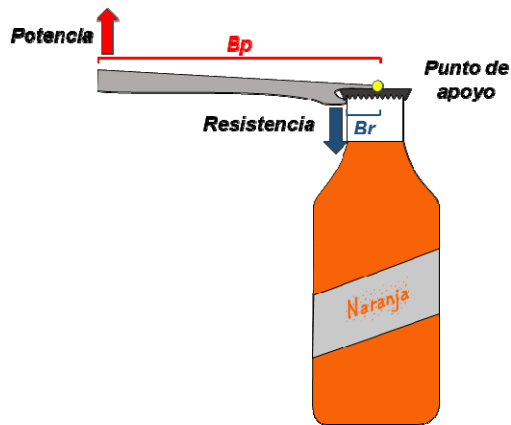


Figura 6.23: Palanca de segundo género o interresistente. Descripción en el texto.

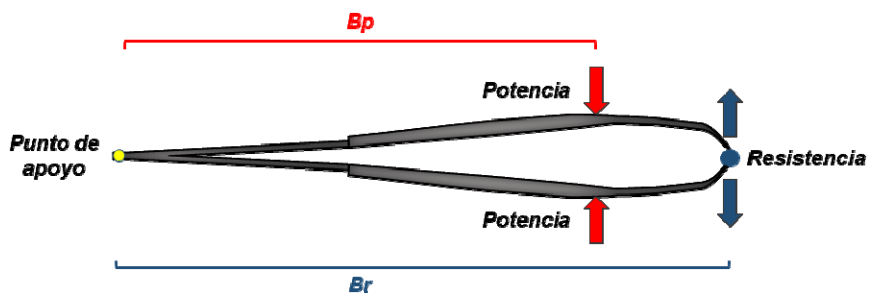


Fig. 6.24: Palanca de tercer género o interpotente. Descripción en el texto.

### Palanca del miembro anterior

En los miembros anteriores, a nivel del antebrazo, el sistema de palanca interpotente se compone de la siguiente manera. El punto de apoyo corresponde a la articulación del codo. En la parte anterior del antebrazo se encuentra el brazo potente, que incluye los músculos extensores carporradial y digital común. En posterior del antebrazo se dispone el brazo resistente, correspondiente a los músculos flexores cubital del carpo y cubital lateral (Fig. 6.25).

En la articulación escápulo-humeral se aplica el mismo sistema de palanca. Aquí, la articulación actúa como punto de apoyo, el brazo y antebrazo como resistencia y la contracción del músculo deltoides representa la fuerza potente.

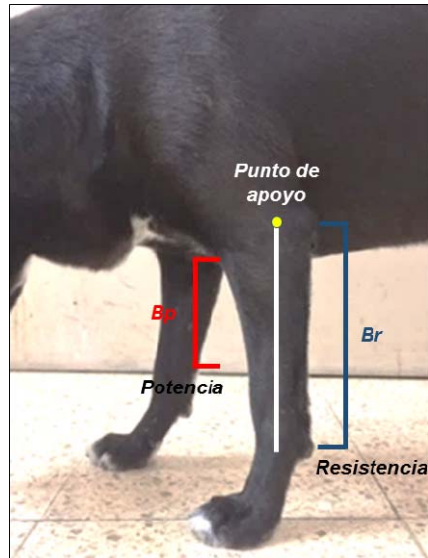


Figura 6.25: Sistema de palanca interpotente en el miembro anterior de un canino. Descripción detallada en el texto.

### Palanca del miembro posterior

En este caso, la articulación de la rodilla actúa como punto de apoyo. El brazo potente corresponde al músculo gastrocnemio ubicado en la parte posterior del miembro, mientras que el brazo resistente a los músculos a lo largo de la tibia. (Fig. 6.26). El mismo sistema se aplica a la articulación coxofemoral.

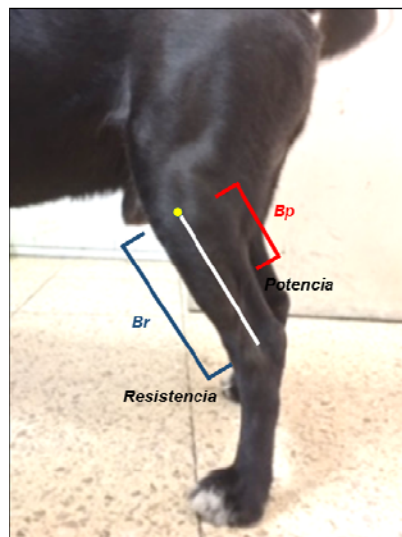


Figura 6.26: Sistema de palanca interpotente en el miembro posterior de un canino. Descripción detallada en el texto.



## Referencias

- Cromer, A. H (1996). Capítulo 3: Momento. En A. H. Cromer (Ed.), *Física para las Ciencias de la Vida (2da edición)* (pp. 42-69). Barcelona, España: Editorial Reverté S. A.
- Cromer, A. H. (1996). Sólidos. En A. H. Cromer (Ed.), *Física para las ciencias de la vida (2da edición)* (pp. 226-241). Barcelona, España: Editorial Reverté S. A.
- Frumento, A. S. (1995). Propiedades mecánicas del músculo esquelético. En A. S. Frumento *Biofísica (3ra edición)* (pp. 71-84). Madrid, España: Mosby/Doyma Libros S. A.
- Gonzalez Ibeas, J. (1974). Elasticidad y resistencia de los materiales. En J. Gonzalez Ibeas, *Introducción a la física y biofísica (1ra edición)* (pp. 22-50). España: Editorial Alhambra S. A.
- Guyton, C. A., Hall, J. E. (2001). Capítulo 6: Contracción del Músculo esquelético. En C. A. Guyton y J. E Hall, *Tratado de fisiología médica (10ma edición)* (pp. 79-94). México: McGraw-Hill Interamericana Editores S.A. de C.V.
- Hewitt, P.G (1999). Primera ley del movimiento de Newton: inercia. En P. G. Hewitt. *Física conceptual (3ra edición)* (pp.43-55). México: Addison Wesley Longman, Inc.
- Hewitt, P.G (1999). Tercera ley del movimiento de Newton: acción y reacción. En P. G Hewitt. *Física conceptual (3ra edición)* (pp. 74-82). México: Addison Wesley Longman, Inc.
- Hewitt, P.G (1999). Máquinas. En P. G. Hewitt *Física conceptual (3ra edición)* (pp. 111-114). México: Addison Wesley Longman, Inc.
- Hewitt, P.G (1999). Sólidos. En P.G Hewitt. *Física conceptual (3ra edición)* (pp. 260-274). México: Addison Wesley Longman, Inc.
- Hewitt, P. G (1999). Temperatura, calor y expansión. En P.G. Hewitt. *Física conceptual, (3ra edición)* (pp. 315-323). México: Addison Wesley Longman, Inc.

# CAPÍTULO 7

## Biofísica del aparato respiratorio animal

Daniela Olivera, Daniel Olaiz

### Generalidades: Estado gaseoso

Dependiendo de las condiciones de presión y temperatura todas las sustancias pueden presentarse en alguno de los estados de agregación de la materia: sólido, líquido o gaseoso. Dadas las condiciones existentes en la superficie terrestre, sólo algunos compuestos pueden hallarse de modo natural en los tres estados, tal es el caso del agua. La mayoría de las sustancias se presentan en un solo estado. Así, por ejemplo, los metales o los elementos que constituyen los minerales se encuentran en estado sólido y el oxígeno o el  $\text{CO}_2$  en estado gaseoso.

Particularmente el estado gaseoso, es en diversos aspectos más sencillo que el líquido y el sólido. Las moléculas que constituyen un gas están muy separadas entre ellas con lo cual casi no son atraídas unas por otras, por lo que se mueven de manera aleatoria a gran velocidad, se encuentran prácticamente libres, de modo que son capaces de distribuirse por todo el espacio en el cual son contenidos. Las fuerzas gravitatorias y de atracción entre las moléculas son despreciables, en comparación con la velocidad a que se mueven.

A partir de estas consideraciones del estado gaseoso es que podemos mencionar las características/propiedades de los gases en general:

- Estado más simple en que se encuentra la materia.
- No tienen ni volumen ni forma definido, ocupan completamente el volumen del recipiente que los contiene adoptando su forma.
  - Son fácilmente compresibles (debido a que existen enormes espacios vacíos entre unas moléculas y otras).
  - Los gases ejercen presión sobre cualquier superficie que entren en contacto ya que están en continuo movimiento.
- Difunden fácilmente.
- Fuerza de cohesión es nula.

# Gases Ideales

## Teoría Cinética Molecular

La teoría cinética de los gases se enuncia en los siguientes postulados, y representa la interpretación molecular del comportamiento del gas ideal:

1. Un gas está constituido por moléculas pequeñísimas ubicadas a gran distancia entre sí; su tamaño (volumen) se considera despreciable en comparación con los espacios vacíos que hay entre ellas.

2. Las moléculas de un gas son totalmente independientes unas de otras, de modo que no existe atracción ni repulsión intermolecular alguna. Con lo cual las moléculas se desplazan en línea recta hasta que colisionan.

3. Las moléculas de un gas se encuentran en movimiento continuo, en forma desordenada; chocan entre sí y contra las paredes del recipiente, dando lugar a la presión del gas.

4. Los choques de las moléculas son elásticos, no hay pérdida ni ganancia de energía cinética, aunque puede existir transferencia de energía entre las moléculas que chocan.

5. La energía cinética media de las moléculas, es directamente proporcional a la temperatura absoluta del gas; se considera nula en el cero absoluto.

## Desviaciones a la idealidad. Gases reales

Se establece que los gases se comportan de manera ideal sólo en determinadas condiciones, estas son: temperaturas altas y presiones muy bajas. Al alejarnos de dichas condiciones presentan un comportamiento real, con lo cual las suposiciones realizadas para la idealidad no son válidas, debido a esto, un gas real presenta las siguientes características:

- El tamaño de sus moléculas no es despreciable.
- Los choques entre las moléculas y con la pared del recipiente hacen que se pierda energía cinética.
- Debido a que las moléculas interactúan unas con otras, actuando fuerzas atractivas o repulsivas, dependiendo de las distancias entre las moléculas, las trayectorias de desplazamiento ya no suponen líneas rectas.
- No se rigen por las Leyes de los gases ideales, sino por la Ecuación de van der Waals, la cual considera el covolumen (volumen ocupado por las moléculas) y la presión interna (producida por las interacciones entre las moléculas).

### Ecuación de van der Waals

La ecuación de van der Waals es una modificación de la ley de gas ideal con el fin de tener en cuenta el tamaño molecular y las fuerzas de interacción moleculares, permitiendo describir de forma más satisfactoria el comportamiento de los gases al alejarse de las condiciones de alta temperatura y baja presión. Su expresión es la siguiente:

$$\left(P + a \frac{n^2}{V^2}\right)(V - nb) = nRT$$

Donde P: presión del gas,

V volumen del gas,

T temperatura absoluta del gas,

R constante universal de los gases,

n número de moles del gas,

b constante que tiene en cuenta el volumen de las moléculas o covolumen,

a constante que tiene en cuenta las interacciones entre las moléculas.

a y b son valores particulares para cada gas.

### Leyes de los gases ideales

Estas leyes describen el comportamiento de los gases en condiciones de idealidad (altas temperaturas y bajas presiones).

#### Ley de Boyle y Mariotte

Esta ley relaciona el volumen y la presión de una cierta masa de gas cuando su temperatura no varía (proceso isotérmico). El postulado dice: El volumen de una masa de gas determinada a temperatura constante es inversamente proporcional a la presión.

Matemáticamente esto queda expresado como:

$$P \cdot V = K_1$$

Donde P: presión del gas,

V: volumen del gas,

K<sub>1</sub>: constante de proporcionalidad que depende de la temperatura, de la masa y naturaleza del gas.

Si consideramos que una cierta masa de un gas cambia de un estado inicial 1 a un estado final 2, esta ley puede expresarse como:

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$$

Dónde:  $P_1$ : presión del gas en el estado 1,

$V_1$ : volumen del gas en el estado 1,

$P_2$ : presión del gas en el estado 2,

$V_2$ : volumen del gas en el estado 2.

En la figura 7.1 A se representa mediante un esquema la aplicación de esta ley. En este ejemplo, el gas se encuentra en un recipiente a temperatura constante y experimenta un cambio de presión, de  $P_1$  a  $P_2$  (disminución), con lo cual el volumen que ocupa cambia, aumentando de  $V_1$  a  $V_2$ , verificándose la ley mencionada. La figura 7.1 B grafica cómo es la evolución de ambas variables, presión y volumen, a temperatura constante.

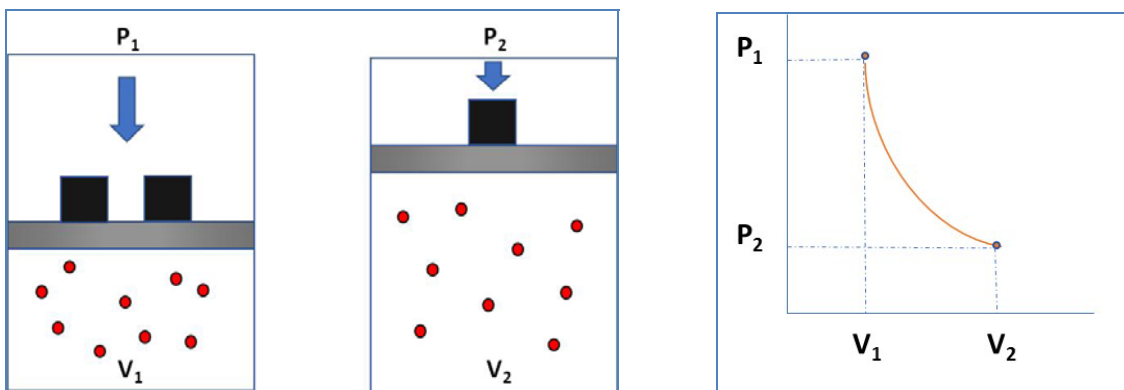


Figura 7.1: Ejemplo de aplicación de la Ley de Boyle y Mariotte. A) Representación esquemática, B) Evolución de la presión y el volumen.

### Ley de Charles-Gay Lussac

Esta ley enunciada por ambos científicos, parte de la base experimental que cuando una cierta masa de gas se calienta a presión constante, ésta presenta un aumento de volumen, se expande, en cambio cuando se enfría, se contrae (Fig. 7.2).

Entonces, para una presión determinada, si graficamos los cambios de volumen que experimenta una masa de gas al variar su temperatura resulta una línea recta como se muestra en la figura 7.3. Las líneas llenas representan este comportamiento en la práctica ya que por debajo de cierta temperatura, los gases se convierten en líquidos (líneas punteadas). Se puede ver también en este gráfico que todas las líneas llegan a un mismo valor, 273,15 °C, el cual corresponde al cero absoluto o cero Kelvin (más detalle ver Capítulo 9).

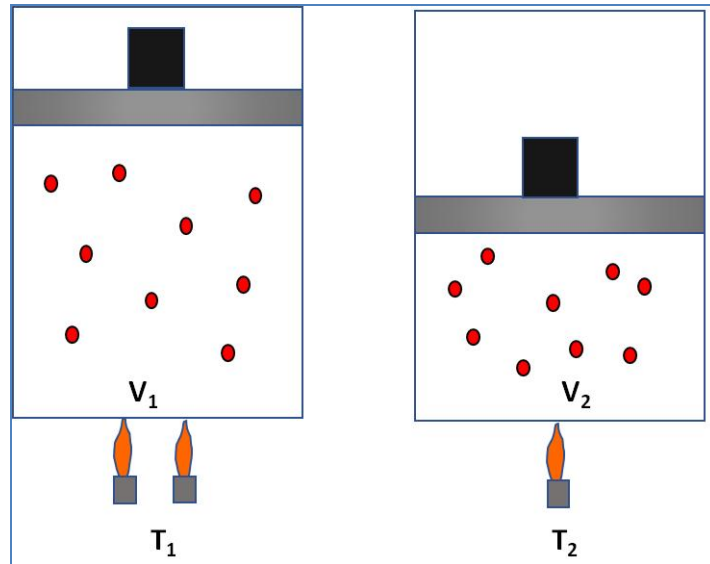


Figura 7.2: Representación esquemática de la Ley de Charles-Gay Lussac.

Estas experiencias dieron lugar al postulado de la Ley Charles-Gay Lussac: El volumen de una determinada masa de gas, a presión constante, es directamente proporcional a la temperatura absoluta.

Matemáticamente esta ley queda expresada como:

$$\frac{V}{T} = K_2$$

Donde V: volumen del gas,

T: temperatura absoluta del gas (Temperatura en °C +273,15)

$K_2$ : constante de proporcionalidad que depende de la masa y naturaleza del gas y de la presión a la que se encuentra.

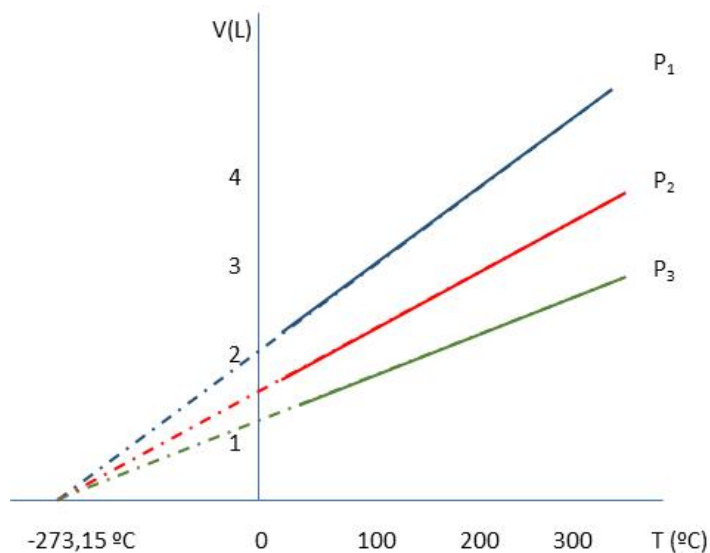


Figura 7.3: Gráfico de la variación del volumen con la temperatura absoluta de una muestra de gas cuando la presión se mantiene constante.

Por lo tanto, si tenemos una masa de gas que se encuentra en un estado inicial 1 ( $P_1, V_1, T_1$ ) y pasa a un estado final 2 donde se mantiene constante la presión ( $P_1, V_2, T_2$ ), la expresión de la Ley de Charles-Gay Lussac resulta:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Donde  $V_1$ = volumen ocupado por el gas en el estado inicial,

$T_1$  = temperatura absoluta del gas en el estado inicial,

$V_2$ = volumen ocupado por el gas en el estado final,

$T_2$ = temperatura absoluta del gas en el estado final.

Análogamente, dichos investigadores postularon que, a volumen constante, la presión de una determinada masa de gas es directamente proporcional a su temperatura absoluta.

Esto matemáticamente es:

$$\frac{P}{T} = K_2$$

Donde P: presión del gas,

T: temperatura absoluta del gas (Temperatura en °C +273,15)

$K_3$ : constante de proporcionalidad que depende de la masa y naturaleza del gas y del volumen que ocupa.

### Ecuación de Estado. Ecuación de los Gases Ideales

De la combinación de las leyes enunciadas anteriormente,

Ley de Boyle – Mariotte:

$$PV = K_1$$

Ley de Charles Gay Lussac:

$$\frac{V}{T} = K_2$$

podemos llegar a una expresión general donde ninguna variable se mantiene constante, con lo cual resulta:

Por lo tanto, si una cierta masa de gas varía su condición desde un estado inicial 1, hasta un estado final 2, al aplicar la ecuación de estado resulta:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

Dicha ecuación también la podemos expresar como:

$$P.V = \text{constante} . T$$

Considerando a R como la constante universal de los gases, a partir de esta última fórmula surge la **Ecuación de los gases ideales**:  $PV = RT$  (Ecuación para 1 mol de gas); en tanto considerando n moles:

$$P.V = n.R.T$$

Donde P: presión del gas

V: volumen del gas

n: número de moles de gas

R: constante universal de los gases ideales

T: temperatura absoluta del gas en Kelvin.



## Determinación de R

La constante R, o constante universal de los gases ideales se obtiene despejándola de la Ecuación de los gases ideales, considerando 1 mol de gas en condiciones estándar de presión y temperatura, esto es a 0 °C (273,15 K) y a 1 atm de presión. En estas condiciones, un mol de cualquier gas ocupa 22,4 Litros, con lo cual reemplazando estos valores en la ecuación resulta:

$$R = \frac{P \cdot V}{n \cdot T}$$
$$R = \frac{1 \text{ atm} \cdot 22,4 \text{ litros}}{1 \text{ mol} \cdot 273,15 \text{ K}}$$
$$R = 0,082 \frac{\text{litros} \cdot \text{atm}}{\text{K} \cdot \text{mol}}$$

Análogamente, si queremos expresar R en otro sistema de unidades, debemos expresar V y P en dicho sistema. Por ejemplo en unidades del sistema C.G.S., el volumen será: 22414 cm<sup>3</sup> y la presión 1,013 10<sup>6</sup> Din/cm<sup>2</sup>, con lo cual R resulta:

$$R = \frac{1,013 \cdot 10^6 \frac{\text{Dinas}}{\text{cm}^2} \cdot 22414 \text{ cm}^3}{1 \text{ mol} \cdot 273,15 \text{ K}}$$
$$R = 8,31 \cdot 10^7 \frac{\text{ergios}}{\text{K}} \text{ mol}$$

En el sistema M.K.S. será igual a 8,31 J/ K mol y si consideramos que:

$$1 \text{ J} \text{-----} 0,24 \text{ cal}$$

$$8,31 \text{ J} \text{---} x = 1,987 \approx R = 2 \text{ cal / K mol}$$

## Mezcla de gases. Ley de Dalton

La mayoría de los gases que encontramos en la vida diaria son mezclas de gases como es el caso del aire que inhalamos y que exhalamos.

En condiciones de baja presión y alta temperatura y si los gases de la mezcla no reaccionan entre sí, podemos suponer que estos tienen un comportamiento ideal, con lo cual la ecuación

general de los gases ideales es válida. En ese sentido, John Dalton describió mediante el siguiente postulado que: la presión total en una mezcla de gases es igual a la suma de las presiones parciales de cada gas en la mezcla.

Entonces la presión total  $P_T$  de una mezcla de gases es:

$$P_T = P_{p1} + P_{p2} + P_{p3} + \dots + P_{pn}$$

Donde  $P_p$ : presión parcial del gas

$n$ : número de gases en la mezcla

Siendo la presión parcial de un gas en una mezcla gaseosa, la presión que éste tendría si dicho gas se encontrase solo ocupando el total del volumen a igual temperatura.

Matemáticamente la presión parcial de un gas se expresa como:

$$P_{pi} = X_i P_T$$

Donde:  $P_{pi}$ : presión parcial del gas  $i$

$X_i$ : fracción molar del gas  $i$

$P_T$ : presión total de la mezcla de gases

La fracción molar de un gas ( $X$ ) se obtiene a partir del número de moles del gas y de los moles totales de los gases que forman la mezcla, mediante la siguiente expresión:

$$X_i = \frac{n_i}{n_T}$$

Donde  $n_i$ : número de moles de  $i$  en la mezcla

$n_T$ : número de moles totales

En la figura 7.4, se esquematiza la aplicación de esta ley en una mezcla de dos gases, 1 y 2, con lo cual la presión total y las presiones parciales se expresarían como:

$$P_T = P_1 + P_2$$

$$P_1 = X_1 P_T$$

$$P_2 = X_2 P_T$$

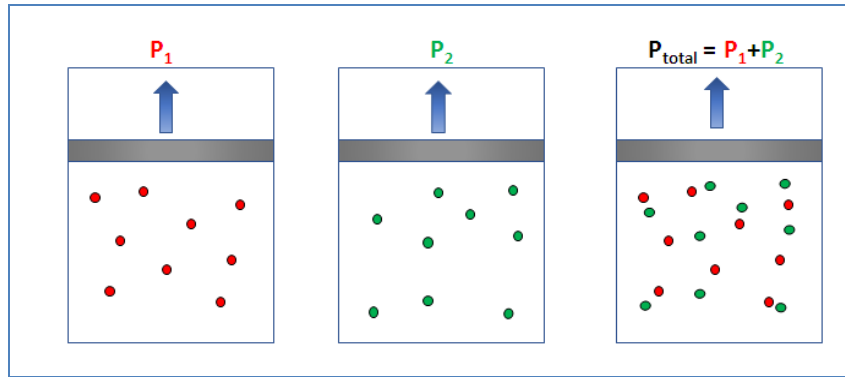


Figura 7.4: Representación esquemática de la Ley de Dalton.

Por ejemplo, si tenemos una mezcla de gases formada por 8 moles de  $N_2$ , 4 moles de  $O_2$  y 2 moles  $CO_2$ , las fracciones molares de cada gas serán:

$$X_{N_2} = \frac{8 \text{ moles}}{14 \text{ moles}} = 0,57$$

$$X_{O_2} = \frac{4 \text{ moles}}{14 \text{ moles}} = 0,29$$

$$X_{CO_2} = \frac{2 \text{ moles}}{14 \text{ moles}} = 0,14$$

En este ejemplo se puede ver que la suma de las fracciones molares da 1, resultado que siempre se cumple en una mezcla de gases.

Ahora bien, en este mismo ejemplo, si la presión total es de 1 atm podemos calcular la presión parcial de cada gas:

$$P_{p_{N_2}} = X_{N_2} P_T = 0,57 \cdot 1 \text{ atm} = 0,57 \text{ atm}$$

$$P_{p_{O_2}} = X_{O_2} P_T = 0,29 \cdot 1 \text{ atm} = 0,29 \text{ atm}$$

$$P_{p_{CO_2}} = X_{CO_2} P_T = 0,14 \cdot 1 \text{ atm} = 0,14 \text{ atm}$$

## Solubilidad de gases en líquidos

Al visitar un acuario y observar las peceras nos puede llamar la atención que por algún lugar del receptáculo surjan burbujas en forma constante. Resulta evidente que para que los peces vivan en las mejores condiciones, el agua del medio debe estar debidamente oxigenada (Fig. 7.5), en otras palabras, el aire (inyectado por un aireador) tiene la capacidad de solubilizarse en el agua.



Figura 7.5: Imagen de aire inyectado en una pecera.

Todas las sustancias, independiente de su estado de agregación (sólidos, líquidos y gases) pueden disolverse en un solvente. Definiremos entonces a la solubilidad como la mayor cantidad de sustancia que puede disolverse en un solvente dado.

Específicamente, la solubilidad de los gases en los líquidos suele indicarse como la relación que se establece entre el volumen de gas disuelto y el volumen total de la solución. Dicha relación fue establecida por R. Bunsen denominándose por este motivo, como Coeficiente de Absorción de Bunsen y se define como el volumen de gas, a 0 °C y a 1 atm de presión, disuelto por unidad de volumen de solvente en dichas condiciones.

$$\delta = \frac{V_1}{V_0}$$

Donde  $\delta$  = Coeficiente de absorción

$V_1$  = Volumen de gas disuelto

$V_0$  = volumen del solvente

Por ejemplo, si el valor del coeficiente de absorción del oxígeno a la presión atmosférica en contacto con el agua es 0,049, esto significa que en 100 ml de agua se pueden disolver 4,9 ml de  $O_2$  en las condiciones indicadas.

Teniendo en cuenta que el volumen del gas disuelto se mide a 0°C y a 1 atm de presión y que en estas condiciones un mol de cualquier gas ocupa aproximadamente 22,4 litros, podemos dividir el coeficiente de absorción por 22,4 y obtener el coeficiente de solubilidad del gas,  $\alpha$ , expresado en moles por litro a la temperatura de la experiencia y a 1 atm de presión.

$$\alpha = \frac{\delta}{22,4 \text{ l}}$$

### Efecto de la presión sobre la solubilidad de los gases. Ley de Henry

Según la teoría cinética, la cantidad de gas que se disuelve en un líquido depende de la frecuencia de choques de las moléculas de gas sobre la superficie del líquido.

Si suponemos que tenemos un gas en equilibrio con un líquido, y aumentamos la presión del gas, entonces más moléculas chocarán con la superficie del líquido aumentando así la cantidad de moléculas de gas que pasan al solvente, y por consiguiente, la solubilidad del gas en el líquido (Fig. 7.6).

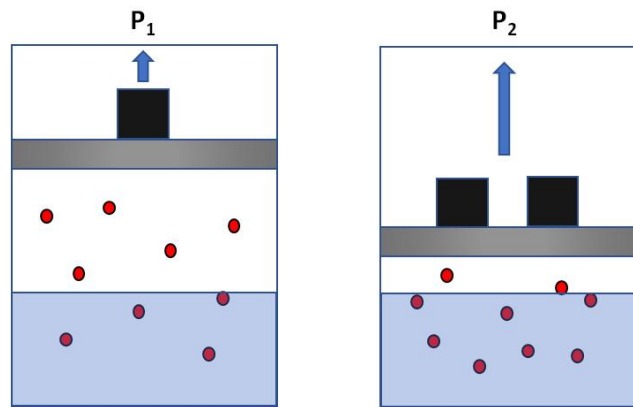


Figura 7.6: Representación del aumento de la presión de un gas sobre una solución ( $P_2 > P_1$ ).

La solubilidad de gases en líquidos en función de la presión parcial del gas es expresada cuantitativamente por la ley de Henry. Esta ley vincula la cantidad de gas disuelto con la presión parcial de dicho gas y puede enunciarse de la siguiente manera: “la cantidad de gas disuelta en un volumen dado de solvente, a temperatura constante, es proporcional a la presión del gas en equilibrio con la solución”. Por lo tanto, a partir de ella se infiere que a medida que la presión aumenta, también lo hace la solubilidad del gas que está en contacto con la solución.

Matemáticamente podemos expresar como:

$$C = \alpha \cdot P_p$$

Donde C= concentración de gas disuelto, es decir cantidad de gas en un volumen dado.

$\alpha$ = coeficiente de solubilidad

$P_p$ = presión parcial del gas

Por lo tanto la solubilidad de un gas en un líquido es directamente proporcional a la presión parcial del gas.

$$S = \alpha \cdot P_p$$

Donde  $S$ = solubilidad del gas en el líquido expresado en moles de gas/ volumen de líquido

$\alpha$ = coeficiente de solubilidad, expresado en Molar/ presión

$P_p$ = presión parcial, expresado en unidades de presión.

El coeficiente de solubilidad es función de la temperatura y del tipo de gas, por ejemplo, a 37 °C el oxígeno en sangre tiene un coeficiente de solubilidad de 0,0013 mM/mm de Hg, en cambio para el CO<sub>2</sub>, el  $\alpha$  es de 0,0299 mM/mm de Hg.

En relación a la temperatura, se produce una disminución de dicho parámetro con el aumento de la temperatura. Esto puede atribuirse a que al aumentar la temperatura también lo hace la energía cinética de las moléculas de líquido generando espacios por los cuales se escapan las moléculas gaseosas; a su vez, con el aumento de temperatura, las moléculas gaseosas también se mueven más rápido y comienzan a aumentar su velocidad de escape del líquido.

## La respiración pulmonar

La respiración es un proceso involuntario y automático, en el que se extrae el oxígeno del aire inspirado y se expulsan los gases de desecho con el aire espirado.

### Difusión y transporte de gases durante la respiración

El aire atmosférico es una mezcla de gases constituida por nitrógeno (78%), oxígeno (21%), dióxido de carbono (0,03%) y 0,97 de vapor de agua y otros gases. Fisiológicamente el más importante es el oxígeno y debemos tener en cuenta que siempre el aire contiene una pequeña cantidad de vapor de agua que dependerá de la humedad ambiental.

El aire ingresa a los pulmones durante la fase activa de la respiración denominada inspiración, la finalidad de ésta es llevar el aire atmosférico a través del árbol respiratorio hasta la unidad funcional del pulmón, el alvéolo pulmonar. Es en esta estructura, donde el aire cede el oxígeno a la sangre y toma de ella el dióxido de carbono. Este proceso que tiene por

resultado el intercambio de gases entre el exterior y el interior se denomina respiración externa. En la figura 7.7 se observa un corte histológico de pulmón y un esquema de alvéolo pulmonar graficando la difusión de  $O_2$ .

Es importante recalcar que no todo el aire que ingresa durante la inspiración llega hasta los alvéolos, gran parte del mismo permanece en las vías aéreas superiores y árbol bronquial, llamándose a este lugar, espacio muerto. La mezcla que se produce entre el aire inspirado y el del espacio muerto hace que la concentración de  $O_2$  en los alvéolos sea menor que la del aire atmosférico. Debido a la conformación particular del epitelio alveolar, éste no deja pasar con facilidad a iones tales como el Na y el K, pero sí al agua y a gases como el  $O_2$ ,  $CO_2$  y  $N_2$ . Dicho epitelio, sirve de límite entre el exterior y el compartimiento corporal. El  $O_2$  lo atraviesa por difusión simple, sin gasto de energía, respondiendo este comportamiento a la Ley de Fick (Capítulo 2), permitiéndose este flujo gracias a la existencia de una diferencia de concentración (en este caso, diferencia de presiones parciales), a una distancia determinada (entre el epitelio alveolar y el endotelio capilar) y a un área de intercambio. Podemos afirmar entonces, que el  $O_2$  pasa de una fase gaseosa a una líquida representada por el plasma sanguíneo, donde se solubiliza aproximadamente un 3% del mismo siendo el resto captado por una proteína altamente especializada para este fin que es la hemoglobina, la cual se encuentra dentro de los eritrocitos y da a la sangre su característico color rojo; se forma así la oxihemoglobina. El oxígeno tomado en los alvéolos pulmonares es llevado por los glóbulos rojos de la sangre hasta el corazón y después distribuido por las arterias a todas las células del cuerpo.

La respiración celular se produce cuando el oxígeno llega a los tejidos y es utilizado por las células, con producción de dióxido de carbono por parte de las mismas.

Así, el  $CO_2$  proveniente de la respiración celular es también transportado por la sangre en tres formas diferentes: como gas disuelto, como bicarbonato y como compuestos carbamínicos (combinación entre el  $CO_2$  y los grupos amino libres de la hemoglobina). Este, llega al corazón por la vena cava siendo impulsado por el ventrículo derecho hasta el tejido pulmonar. Debido a la presencia de un gradiente de presión entre el  $CO_2$  plasmático y el alveolar (mayor  $P_p$  en el plasma y menor  $P_p$  en el alvéolo), dicho gas difunde. Es así que mediante la segunda etapa de la respiración denominada espiración, la cual es pasiva, el  $CO_2$  es eliminado al aire atmosférico. Como conclusión de este proceso es muy importante entender las diferencias entre la composición del aire inspirado y la del aire espirado. En el cuadro de la figura 7.8 se presentan las variaciones de las presiones parciales de cada gas interviniente en la respiración desde el aire atmosférico hasta el aire espirado.



Figura 7.7: Corte histológico de pulmón y esquema de difusión O<sub>2</sub> desde el alvéolo pulmonar.

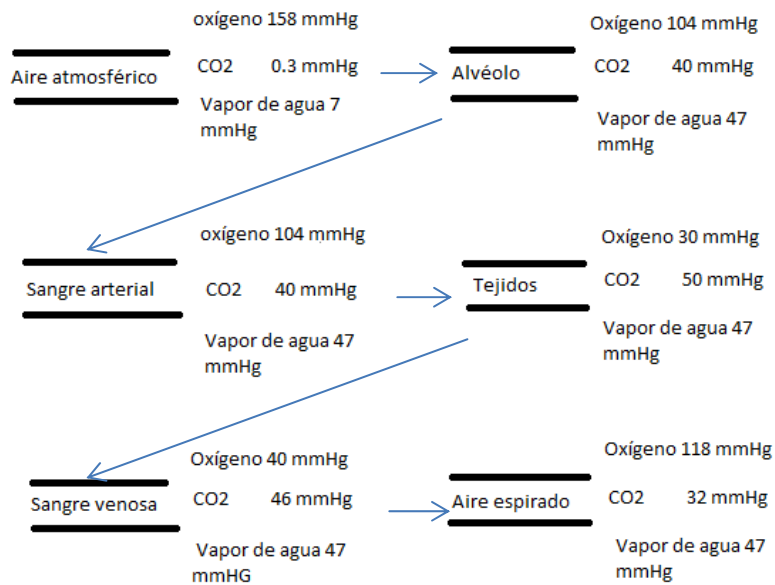


Figura 7.8: Presiones parciales de cada gas interviniente en la respiración.

## Mecánica respiratoria

Para una mejor comprensión de la mecánica respiratoria haremos una reseña anatómica de las estructuras intervinientes y las funciones por ellas desempeñadas.

El aire atmosférico ingresa por las fosas nasales donde los animales poseen mecanismos que filtran el aire de impurezas groseras y lo calientan con la finalidad de lograr mayor volumen de oxígeno a nivel pulmonar (Ley de Charles). El aire avanza por la laringe, tráquea y



bronquios, sirviendo estas estructuras tubulares como mecanismos de conducción hasta el órgano blanco, el pulmón.

El pulmón se sitúa en una cavidad denominada caja torácica la cual posee particularidades propias que permiten alojarlo y que se dilate durante la inspiración. Anatómicamente, la caja torácica posee elementos óseos y musculares, conteniendo además una fina lámina de una membrana epitelial, la pleura, que envuelve a los pulmones y los separa de la cavidad torácica. Las costillas son estructuras óseas, que partiendo de la columna vertebral aportan forma y rigidez, íntimamente insertos en ellas se encuentran los músculos intercostales externos e internos cuya función radica en acomodar el tórax durante la inspiración y la espiración respectivamente. Como último elemento citaremos al diafragma, músculo que separa el tórax de la cavidad abdominal e interviene en forma muy activa durante el ciclo respiratorio.

Durante la inspiración, proceso activo, la cavidad torácica se expande debido a la contracción del diafragma y de los músculos intercostales externos provocando de esta manera una disminución de la presión intratorácica, la cual se hace menor que la atmosférica, generando así un gradiente de presiones que provoca la entrada de aire a los pulmones para equilibrar esa diferencia. En otras palabras nos indica que la presión pulmonar durante la inspiración es negativa con respecto a la atmosférica (-1 mm de Hg), y la presión intrapleural más negativa aún (- 6 mm de Hg).

Cuando termina la contracción de los músculos inspiradores, la caja torácica y los pulmones vuelven a su posición de reposo y en consecuencia, el diámetro del tórax se reduce y el pulmón, por su elasticidad, se retrae, disminuyendo el volumen pulmonar y en consecuencia, aumenta la presión intratorácica, generando una presión positiva respecto a la atmosférica y por lo tanto el aire es expulsado; a este proceso se lo denomina espiración.

Durante la espiración la presión pulmonar aumenta (+1 mm de Hg) y la intrapleural también (+3 mm de Hg) siendo ésta, de carácter pasivo. Vale recordar que para respirar siempre debe existir una diferencia de presiones entre el tórax y la atmósfera, caso contrario, como ocurre ante alguna lesión que perfora la cavidad torácica, las presiones se igualarían provocando el colapso de los pulmones.

### **Distensibilidad- Compliance pulmonar**

Una de las características más importantes del tejido pulmonar es la elasticidad, propiedad que permite al órgano deformarse en el sentido de su volumen al aumentar la presión y volver a su tamaño original, al disminuir la misma (distensibilidad).

Si consideramos un pulmón fuera de la cavidad torácica e insuflamos aire por sus vías aéreas, podremos determinar los cambios de volumen,  $\Delta V$ , que se producen al incrementar la presión transmural,  $\Delta P$ , es decir la diferencia de presión entre el exterior y el interior del órgano.

El cociente entre el incremento de volumen  $\Delta V$  y el incremento de la presión  $\Delta P$  se denomina complacencia o compliance pulmonar.

$$\text{Compliance} = \frac{\Delta V}{\Delta P}$$

Dónde:  $\Delta V$  es variación de volumen,  
 $\Delta P$  variación de presión.

La distensibilidad varía según se produzca la inspiración o la espiración y esa diferencia se conoce como fenómeno de histéresis.

La histéresis representa la resistencia del pulmón a cambiar su volumen (inspiración) y a volver a su volumen inicial (espiración). Se visualiza mediante la diferencia de volumen pulmonar entre las curvas de inflación y deflación para una misma presión, en las curvas presión-volumen (Fig. 7.9).

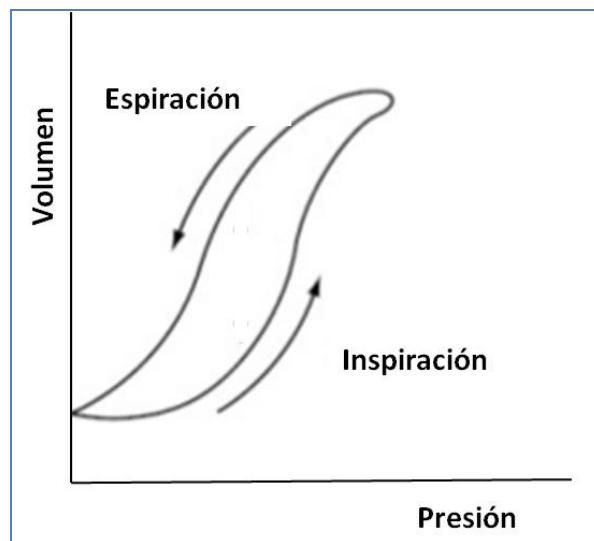


Figura 7.9: Diagrama de distensibilidad pulmonar.

### Tensión superficial

El interior de cada alvéolo se encuentra recubierto por una fina capa de agua por lo cual es necesario hacer referencia a la característica más importante de los líquidos que es la tensión

superficial. Si observamos la figura 7.10, notaremos que la molécula de agua en el seno del líquido experimenta iguales fuerzas de atracción en todas direcciones, en cambio las moléculas de agua en la superficie, reciben una mayor fuerza de atracción hacia el interior del líquido dado por la mayor cantidad de moléculas en el interior que en la superficie. Podemos decir, que en la superficie se genera una fuerza que explica la aparición de muchos fenómenos naturales tales como que los líquidos siempre tienden a adoptar forma de gota, que los insectos puedan desplazarse en la superficie e incluso penetrar en una gota de agua y salir de ella sin que se rompa. Esta fuerza en la superficie del líquido actúa en el sentido de la longitud.

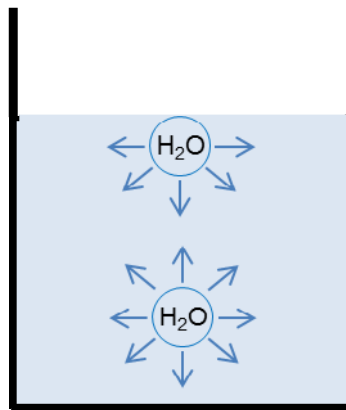


Figura 7.10: Fuerzas de atracción en dos moléculas de agua.

Podemos definir entonces a la tensión superficial ( $\alpha$ ) como “la fuerza en dinas que actúa sobre la superficie de un líquido normalmente a un centímetro de longitud”.

Las unidades correspondientes en los sistemas C.G.S. y M.K.S. son las siguientes:

Sistema C.G.S.

$$\alpha = \frac{F \text{ (dinas)}}{d \text{ (cm)}}$$

Sistema M.K.S.

$$\alpha = \frac{F \text{ (Newton)}}{d \text{ (m)}}$$

Haciendo referencia a esta importante propiedad de los líquidos debemos decir que existen sustancias capaces de modificar la tensión superficial aumentándola o disminuyéndola; las que la aumentan, se denominan sustancias hipsótonas tales como algunas sales iónicas y las que la disminuyen, sustancias batótonas, tal el caso del surfactante pulmonar. El organismo animal hace uso de sustancias que disminuyen la tensión superficial, siendo los casos más

significativos a nivel intestinal para favorecer la digestión de los lípidos y a nivel pulmonar para, favorecer la actividad respiratoria en los alvéolos pulmonares.

### **Surfactante pulmonar**

El surfactante pulmonar es una sustancia tensoactiva con una importante cantidad de funciones, producida a nivel pulmonar por una clase de células llamadas neumocitos tipo II. Está constituida por fosfolípidos y dos tipos de proteínas, unas de carácter hidrófobas, dispuestas hacia la fase gaseosa del alvéolo y otras de carácter hidrófilas, dispuestas hacia la pared alveolar. El más importante de estos fosfolípidos es el dipalmitoil-fosfatidilcolina que se sintetiza a partir del ácido fosfatídico.

En cuanto a las funciones del surfactante, la primordial radica en disminuir la tensión superficial del agua a nivel alveolar y de ese modo evitar que los alvéolos más pequeños se colapsen a expensas de los de mayor tamaño. Como estas estructuras están comunicadas entre sí, sería lógico pensar que al expandirse los mayores durante la inspiración, los menores se colapsarían y el volumen perdido por estos pasaría a los de mayor tamaño; la realidad indica que los alvéolos pequeños tienen mayor tensión superficial y su actividad es más efectiva durante el ciclo respiratorio. Otras funciones del surfactante son: permitir que el pulmón sea más distensible y disminuir el trabajo respiratorio e impedir que el plasma de los capilares pulmonares rebase sus límites y penetre dentro de los alvéolos generando una condición patológica denominada edema pulmonar.

## Referencias

- Atkins, P.; Jones L. (2006). Capítulo 4 Propiedades de los gases. En P. Atkins y L. Jones, Principios de química: los caminos del descubrimiento. (3ra edición) (pp. 126- 159) Madrid: Editorial Médica Panamericana.
- Chang, R. (2002). Capítulo 5 Gases. En R. Chang. Química (7ma edición) (pp. 153-204). Madrid: McGraw-Hill – Interamericana de España.
- Cicardo, V. (1987). Capítulo 9 Gases. En V. Cicardo. Biofísica. (pp. 65-76). Buenos Aires: López Libreros Editores.
- Cicardo, V. (1987). Capítulo 10 Gases de la sangre. En V. Cicardo. Biofísica. (pp. 77-82). Buenos Aires: López Libreros Editores.
- Fruento A. S. (1995). Temas de Biofísica de la respiración externa. En A.S. Fruento. Biofísica. (pp. 247-268). Madrid: Mosby / Doyma Libros S. A.
- Glasstone S. y Lewis D. (1962). Soluciones de gases en líquidos. En S. Glasstone y D. Lewis. Elementos de Química Física. (pp. 426-429). Buenos Aires: Editorial El Ateneo.
- Murillo López de Silanes M. D. (1995). Ventilación pulmonar. En A. García Sacristán. Fisiología Veterinaria. (pp. 383-395). Madrid: McGraw-Hill – Interamericana de España.

# CAPÍTULO 8

## Biofísica de la circulación sanguínea animal

*Romina Becerra, Joaquín Bruzzo Lafratto, Francisco Pellegrino*

### Fluidos

Si buscamos una definición de fluido encontraremos que se trata de toda sustancia que se deforma de manera continua al actuar sobre ella una fuerza tangencial. Los fluidos incluyen a los líquidos y a los gases. Repasemos las características de estos últimos según el estado de agregación de la materia:

Líquidos: poseen volumen definido adoptando la forma del recipiente que los contiene, son ligeramente compresibles y sus moléculas presentan movimiento libre predominando las fuerzas de atracción entre ellas.

Gases: carecen de volumen y forma propios, son sensibles a los cambios de presión y temperatura, el movimiento de sus moléculas es libre, predominan las fuerzas de repulsión presentando una mayor distancia entre las moléculas.

### Algunas definiciones

En este Capítulo nos vamos a concentrar en características y definiciones relativas a los líquidos. Se considera un **líquido ideal** al que no ofrece resistencia al desplazamiento, si un líquido de esas características se encontrara en un tubo circular una vez puesto en movimiento fluiría permanentemente, sin ser sometido a una fuerza externa, ya que no se producirían rozamientos que lo detengan. De esto se desprende que un líquido ideal no forma torbellinos, no posee viscosidad, las capas que lo forman no se adhieren entre sí, no experimenta pérdida de energía por frotamiento y no sufre pérdidas por presión, siendo perfectamente incompresible y perfectamente móvil.

En cambio, un **líquido real** puede ser levemente compresible, su movimiento puede ser laminar o turbulento, dependiendo de la velocidad, densidad y geometría del recipiente, ofrece resistencia al desplazamiento (viscosidad), con pérdida de energía al producirse el frotamiento y sufre pérdidas de presión.

Se denomina **línea de corriente** a la trayectoria seguida por una partícula de un líquido en movimiento. El conjunto formado por todas las líneas de corriente que atraviesan una determinada sección se denomina **vena líquida**. Cuando un fluido se encuentra en movimiento y sus propiedades estáticas y dinámicas (presión, temperatura, velocidad) en un punto determinado no se modifican, se dice que presenta un **régimen estacionario**.

## Dinámica de fluidos

### Teorema de Bernoulli

Este Teorema es una consecuencia del Principio de conservación de la energía mecánica aplicado a la circulación de un líquido ideal con régimen estacionario. Está basado en el concepto de que la energía total que entra a través de una sección es la misma que sale por la otra, siendo esto válido solamente para líquidos (Fig. 8.1).

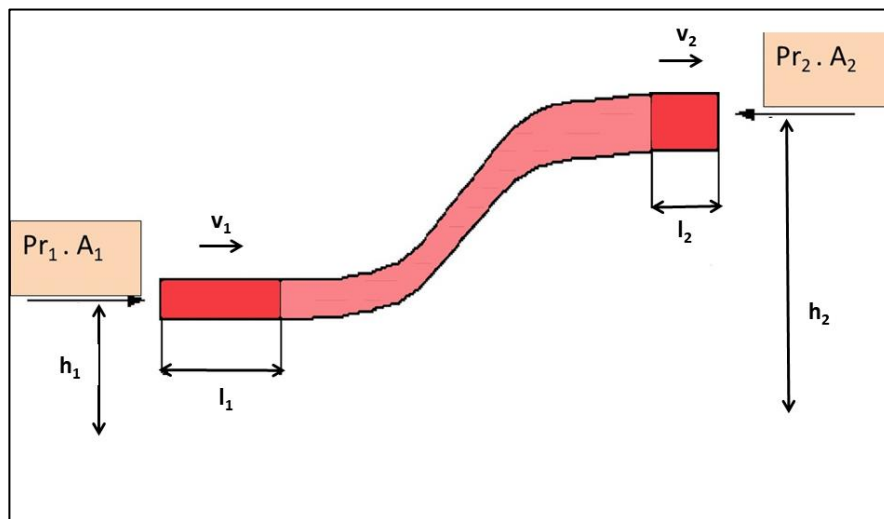


Figura 8.1: Esquema del Teorema de Bernoulli.

El teorema de Bernoulli describe el comportamiento de un fluido moviéndose a lo largo de una línea de corriente. Como ya mencionamos, considera un fluido ideal circulando por un

conducto cerrado, afirma que la energía mecánica de un flujo incompresible y no viscoso (sin rozamiento) es constante a lo largo de una línea de corriente e implica una relación entre los efectos de la presión, la velocidad y la gravedad.

Debemos considerar que la energía de un fluido consta de tres componentes:

- a. Energía cinética ( $E_c$ ): es la energía debida a la velocidad que posee el fluido.
- b. Energía potencial gravitacional o de altura ( $E_p$ ): es la energía debida a la altura a la cual se encuentra el fluido.
- c. Energía de presión lateral ( $E_{pr}$ ): energía que el fluido contiene debido a la presión lateral que ejerce sobre las paredes del tubo.

Entonces, teniendo en cuenta la circulación de un líquido ideal, este teorema deduce que la sumatoria de estos tres tipos de energía permanece constante.

$$E_{pr} + E_p + E_c = Cte$$

$E_{pr}$  es equivalente al trabajo ( $W$ ) realizado sobre las paredes del tubo. Por lo tanto, matemáticamente podremos decir que:

$$(1) E_{pr} = W = F \cdot L = Pr \cdot A \cdot L = Pr \cdot V$$

$$(2) E_p = m \cdot g \cdot h$$

$$(3) E_c = 1/2 m \cdot vel^2$$

Siendo: En (1)  $W$  = trabajo;  $F$  = fuerza;  $L$  = longitud;  $Pr$  = presión;  $A$  = área o superficie;  $V$  = volumen. En (2)  $m$  = masa;  $g$  = aceleración de la gravedad;  $h$  = altura. En (3)  $m$  = masa;  $vel$  = velocidad.

Aplicando el principio a cada unidad de volumen:

$$\frac{Pr \cdot V}{V} + \frac{m \cdot g \cdot h}{V} + \frac{1/2 m \cdot vel^2}{V} = \frac{Cte}{V}$$

Simplificando y reemplazando en esta ecuación diremos que:

$$Pr + \delta \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} \delta \cdot vel^2 = Cte$$



En el árbol vascular este teorema no se cumple ya que la sumatoria de  $E_{pr} + E_p + E_c$  es mayor en el sector arterial que en el venoso.  $E_p$  y  $E_c$  permanecen constantes a lo largo de todo el árbol circulatorio, no así  $E_{pr}$ , siendo mayor en el lecho arterial que en el venoso. Además, la sangre no es un líquido ideal sino real (con pérdida de energía por frotamiento).

## Viscosidad dinámica

Newton definió la viscosidad dinámica como “la aspereza entre capas adyacentes de un líquido en movimiento”. También podemos definirla como la resistencia que los líquidos reales oponen a la deformación. Teniendo en cuenta un líquido ideal, podemos imaginarnos que discurre como una serie de láminas paralelas entre sí, con mayor velocidad en el centro y disminuye a medida que nos acercamos a las paredes del tubo que lo contiene. Si extraemos imaginariamente dos láminas de  $1 \text{ cm}^2$ , separadas por  $1 \text{ cm}$  de distancia y fuera necesario imprimirle a una de ellas una fuerza de una Dina para que exista entre las dos capas una diferencia de velocidad de  $1 \text{ cm/seg}$ , tendremos la unidad de viscosidad que fue denominada poise, en honor a Jean Poiseuille. El poise es una unidad muy grande y por eso se usa muy frecuentemente el centipoise ( $1 \text{ centipoise} = 0,01 \text{ poise}$ ) (Fig. 8.2).

Matemáticamente la fórmula se expresa como:

$$\eta = \frac{F \cdot h}{S \cdot vel}$$

Siendo:  $\eta$ = viscosidad dinámica

F= fuerza

h= altura

S= sección

vel= velocidad

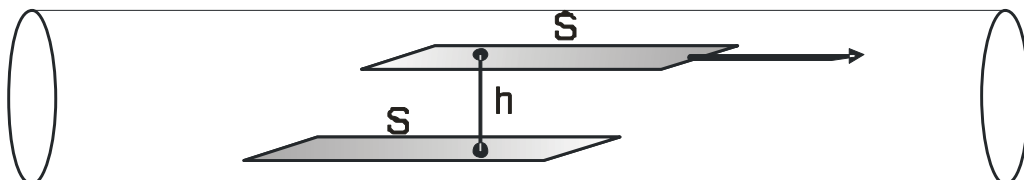


Figura 8.2: Esquema representativo de la viscosidad de un fluido que circula por un tubo

La viscosidad se modifica por los siguientes factores:

- Concentración: a temperatura constante, a medida que aumenta la concentración de soluto (sustancias disueltas), aumenta la viscosidad.
- Temperatura: El coeficiente de viscosidad de los líquidos disminuye al aumentar la temperatura, lo cual es lógico ya que al modificarse las fuerzas intermoleculares se han de modificar también los efectos de rozamiento entre las partículas líquidas que dan lugar a la viscosidad.

A concentración constante, la viscosidad de un fluido es tanto menor cuanto mayor es la temperatura, es decir que guarda una relación inversa.

### **Caudal. Ecuación de continuidad**

Como vimos en el Capítulo 1, se denomina caudal (Q o C) a la relación entre el volumen de líquido que discurre por una determinada sección de un tubo y el tiempo durante el cual ese volumen ha circulado.

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

Imaginando que el líquido atraviesa todos los puntos de una determinada sección (S) con la misma velocidad (vel), esta puede relacionarse con el caudal. El espacio ( $\Delta x$ ) recorrido por el frente de este líquido en un tiempo ( $\Delta t$ ) dado quedará definido como:

$$\Delta x = vel . \Delta t$$

Durante este tiempo habrá atravesado la sección S un volumen ( $\Delta V$ ) de líquido expresado por:

$$\Delta V = S . \Delta x$$

$$\Delta V = S . vel . \Delta t$$

Por lo cual, pasando  $\Delta t$  al primer miembro se obtiene (Fig. 8.3):

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} = S . vel$$

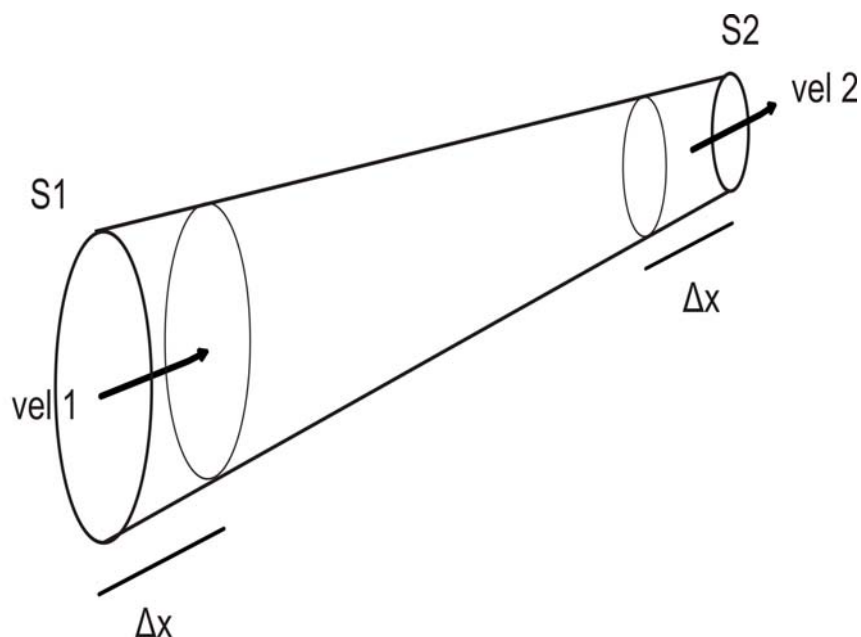


Figura 8.3. Representación de la ecuación de continuidad.

Esta relación se conoce como Ecuación de continuidad, la misma describe que el caudal ( $Q$ ) permanece constante en cualquier sección de un tubo por el cual circula un líquido ideal, con régimen estacionario y a temperatura constante:

$$Q = S_1 \cdot vel_1 = S_2 \cdot vel_2 = S_n \cdot vel_n$$

Esta ecuación puede utilizarse en el caso de los líquidos reales teniendo en cuenta la sección total y considerando como velocidad a la velocidad media, ya que en el caso de los líquidos reales las distintas capas de fluido adquieren diferentes valores de velocidad, siendo máxima en el centro y disminuyendo a medida que el fluido se acerca a las paredes del tubo que lo contiene.

### Ley de Poiseuille

Un líquido real en circulación, presenta cierta resistencia al desplazamiento, por lo cual es necesario que se realice cierto trabajo, implicando por tanto un gasto de energía. Esa resistencia a fluir es una propiedad común de todos los líquidos reales. La energía necesaria para mantener el movimiento puede provenir de una bomba (el corazón en el caso del aparato circulatorio) que genere una diferencia de presión ( $\Delta P$ ) entre los extremos del sistema.

Poiseuille determinó experimentalmente que cuando un líquido de viscosidad ( $\eta$ ) circula como formado por varias láminas o capas paralelas (flujo laminar) en un tubo rígido de radio ( $r$ ) y de longitud ( $l$ ) se observa que el caudal queda determinado por la siguiente expresión:

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

Donde:  $Q$ = caudal ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )

$\Delta P$ = diferencia de presión entre los puntos ( $\text{Dinas}/\text{cm}^2$ )

$r$ = radio del tubo ( $\text{cm}$ )

$\eta$ = viscosidad dinámica (poise)

$l$ = longitud entre los puntos ( $\text{cm}$ )

Podemos decir entonces que el caudal es directamente proporcional a la diferencia de presiones entre dos puntos y que, de todos los términos de la ecuación, el radio se destaca por estar elevado a la cuarta potencia. Esto último implica que si duplicamos el radio y los otros factores permanecen constantes, el caudal aumentará 16 veces. Por lo tanto, para mantener el caudal constante la diferencia de presión deberá disminuir en la misma magnitud.

Por otro lado, sabemos que el caudal va a ser inversamente proporcional a la resistencia ( $R$ ) que presente el líquido en cuestión a fluir, la cual depende de la viscosidad y de las características del sistema de tubos que lo contiene. La resistencia puede calcularse entonces como:

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

Por lo tanto:

$$Q = \frac{\Delta P}{R}$$

## Flujo laminar y turbulento

Como explicamos anteriormente, cuando un líquido con una viscosidad determinada, circula por un tubo capilar, como si estuviese formado por capas o “láminas” paralelas entre sí, decimos que en estos casos el flujo se comporta como “laminar”.

Si este mismo líquido aumenta la velocidad con la que circula (como ocurre por ejemplo al reducir el diámetro del tubo), este flujo se altera, y se formarán remolinos o torbellinos, que alteran la velocidad y presión en diferentes puntos del tubo por el que circulan. El líquido ya no circula en capas, sino que se mezcla y da lugar a un flujo “turbulento” (Fig. 8.4) La velocidad por encima de la cual el flujo se vuelve turbulento se denomina velocidad crítica.

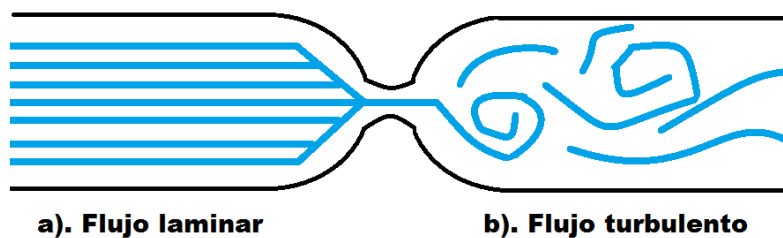


Figura 8.4: Diferentes tipos de flujo que experimentan los vasos. a) Flujo laminar; b) Flujo turbulento

Los factores que determinan si el flujo es laminar o turbulento están relacionados por el número de Reynolds ( $Re$ ), el cual es un número adimensional y matemáticamente se expresa como:

$$Re = \frac{\delta \cdot vel \cdot d}{\eta}$$

Donde  $\delta$  = densidad del fluido,  $vel$ = velocidad,  $d$ = diámetro del tubo,  $\eta$ = viscosidad dinámica.

Cuando el fluido circula en tubos rígidos y de diámetro uniforme, la transición entre flujo laminar y turbulento ocurre aproximadamente cuando  $Re$  adquiere un valor de **2100**. De esta ecuación deducimos que la probabilidad de que el flujo sea turbulento aumenta a medida que la densidad, la velocidad del fluido y el diámetro del tubo aumentan y a medida que la viscosidad disminuye.

## **Hidrodinámica. Hemodinámica**

La **hidrodinámica** se define como la parte de la Física que estudia la distribución de presiones y velocidades en el interior de una masa líquida en movimiento. Cuando hablamos del caso particular de la sangre en el interior de los vasos sanguíneos, lo definimos como **hemodinámica**. Esta disciplina se encarga de estudiar cómo se mueve la sangre por los vasos de diferente calibre, estos son: arterias, arteriolas, capilares, vénulas y venas, así como también la mecánica del corazón.

## **Lecho circulatorio. Ciclo cardíaco**

El corazón funciona como una especie de bomba muscular que, continuamente envía y recibe sangre como parte del sistema cardiovascular, El lado derecho (aurícula derecha) recibe sangre desoxigenada procedente de todo el cuerpo, siendo luego el ventrículo derecho quien bombea la sangre hacia los pulmones. Allí, la sangre se oxigena retornando por la aurícula izquierda al corazón, pasándola al ventrículo izquierdo que se contrae con mucha fuerza y la impulsa para ir a nutrir al resto del organismo. Por esta razón, el ventrículo izquierdo tiene una pared muscular mucho más gruesa, estando sometido a mayor presión.

El ciclo cardíaco es un proceso durante el cual se producen cambios sucesivos de volumen y presión en el corazón durante la actividad cardíaca (contracción (sístole) y relajación (diástole) del corazón). El miocardio se contrae como respuesta a la actividad eléctrica que se produce dentro del sistema conductor del corazón.

## **Presión sanguínea**

En cada ciclo cardíaco, el corazón ejerce mediante su actividad mecánica (contracción ventricular) presión sobre la sangre que posteriormente es transmitida hacia las arterias y venas. Así, podemos decir que la *presión sanguínea* es la fuerza ejercida por la sangre contra las paredes de los vasos sanguíneos (arterias, arteriolas, capilares, vénulas y venas). La presión sanguínea se mide frecuentemente en mm Hg (milímetros de mercurio).

Considerando que la sangre es un líquido que se encuentra en continuo movimiento, se producirá un descenso de la presión a lo largo del sistema circulatorio que dependerá de la resistencia que el flujo sanguíneo encuentre a su paso. Dicha caída será más importante en aquellas zonas en las cuales la resistencia hemodinámica es mayor. De esta forma, en las grandes arterias y venas del organismo, el descenso de la presión será menor que en aquellos

vasos de menor calibre, siendo en las arteriolas donde se producirá la mayor caída de la presión y consecuentemente, la mayor resistencia.

Entonces, la presión sanguínea dependerá de:

- Gasto cardiaco (GC). Es la cantidad de sangre que bombea el corazón en cada minuto. También llamado Volumen minuto.
- Resistencia periférica total o resistencia sistémica vascular (RSV). Es la resistencia que ofrece el sistema vascular al flujo de sangre.

$$\textit{Presión sanguínea} = GC \cdot RSV$$

## **Presión en los diferentes vasos sanguíneos**

### **Arterias**

Las arterias tienen como función principal transportar la sangre a los tejidos. Por ello, están constituidas por paredes fuertes que permiten que la sangre circule en su interior a gran velocidad. De esta manera, la presión sanguínea que se origina en cada contracción ventricular es transmitida por las paredes elásticas de las arterias, lo que habitualmente se percibe como pulso.

La aorta es la principal arteria del organismo y la que presenta mayor diámetro. Toma origen en el ventrículo izquierdo del corazón. En condiciones normales, la presión arterial en la misma oscila aproximadamente entre un valor máximo de 120 mm Hg y un valor mínimo de 80 mm correspondientes a la presión sistólica y diastólica, respectivamente. Desde la aorta, el diámetro de las arterias irá disminuyendo hasta que finalmente las arterias más pequeñas se continuarán con las arteriolas, últimas ramas del sistema arterial.

### **Capilares**

Las arteriolas presentan una pared muscular muy fuerte que les permite controlar, dependiendo de las necesidades, el flujo sanguíneo que llega a cada área tisular. De allí que, las mismas pueden contraerse cerrando por completo su luz o, por el contrario, dilatarse varias veces.

La sangre llega a los capilares desde las arteriolas. Los capilares sanguíneos tienen como principal función el intercambio de nutrientes y productos de deshecho entre los tejidos y la sangre circulante. Esto es posible gracias a que presentan paredes muy delgadas formadas por una sola capa de células endoteliales, a la vez que poseen poros capilares que permiten el

pasaje de agua y otras sustancias. La presión sanguínea es disipada en gran medida cuando llega a los capilares, ya que el área total de los capilares ramificados es mayor que el área del vaso que los origina (arteriolas).

## Venas

Cuando la sangre abandona los capilares ingresa inicialmente a las vénulas. Estas últimas se unen gradualmente hasta formar venas de mayor tamaño. Las venas así formadas son las encargadas de llevar la sangre desde los tejidos de vuelta hacia el corazón. Las venas están constituidas por paredes muy delgadas, ya que la presión que queda dentro de estos vasos sanguíneos es muy pequeña. Sin embargo, el músculo que poseen en su pared es suficiente para poder contraerse, permitiendo que la sangre retorne en la dirección adecuada hacia el corazón. Asimismo, dependiendo de las necesidades de la circulación, las venas pueden dilatarse y cumplir la función de reservorios de sangre.

## Ley de Laplace

La ley de Laplace establece que la tensión en la pared de un vaso sanguíneo ( $T$ ) es directamente proporcional al producto de la presión transmural ( $P$ ) por el radio del vaso ( $r$ ). La  $P$  se origina a partir de la diferencia de presión entre el interior (presión sanguínea) y exterior del vaso (presión de los tejidos) y será, finalmente, la que ejercerán los vasos debido a la tensión de su pared. Es importante comprender que dicha tensión resultante es necesaria para mantener el radio del vaso sanguíneo (Fig. 8.5).

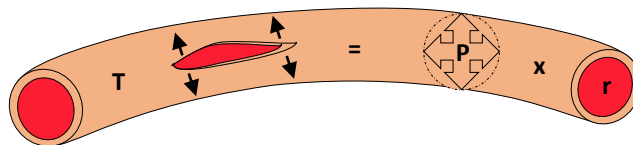


Figura 8.5: Representación de la Ley de Laplace en un vaso sanguíneo aislado.  $T$ , tensión;  $P$ , presión transmural;  $r$ , radio.

Matemáticamente, expresamos esta Ley como:

$$T = Pr \cdot r$$



Dónde:  $T$  = Tensión (Dinas/cm),  $P_r$  = Presión intramural (Dinas/cm<sup>2</sup>) y  $R$  = radio del vaso (cm)

Así, para una diferencia de presión dada, la tensión en la pared de un vaso sanguíneo es proporcional al incremento del radio. Es decir, cuanto mayor sea el radio del vaso, mayor es la tensión de la pared para soportar una determinada presión interna del fluido.

En situaciones en que la presión sanguínea se mantiene constante, la tensión en la pared del vaso es directamente proporcional al radio del mismo (Fig. 8.6).

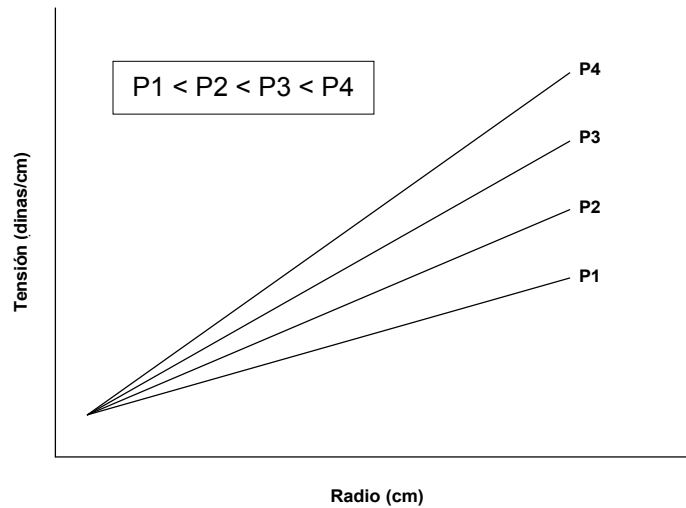


Fig. 8.6: Relación entre la tensión en la pared de un vaso sanguíneo y su radio, cuando la presión permanece constante.

## Referencias

- Cingolani H. (2000). Capítulo 20. Organización general del aparato circulatorio y leyes que rigen el desplazamiento de los líquidos. En H. Cingolani y A. Houssay. *Fisiología Humana de Houssay (7ma edición)*, (pp. 241-243). Argentina: Editorial El Ateneo.
- Cisale H. (2011). Biorreología. En H. Cisale. *Física Biológica Veterinaria (1era edición)*, (pp. 193-203). Argentina: Editorial Eudeba.
- Fruento A.S (1995). Elementos de hidrodinámica. En A. S. Fruento. *Biofísica (3ra edición)*, (pp. 165-178). Madrid, España: Mosby-Doyma Libros.
- Fruento A.S (1995). Mecánica Circulatoria. En A. S. Fruento. *Biofísica (3ra edición)*, (pp. 179-183). Madrid, España: Mosby-Doyma Libros.
- Parisi M (2001). *Biofísica cardíaca y respiratoria, de la atmósfera y del mar*. En M. Parisi. *Temas de biofísica* (pp. 178-186). Santiago, Chile: McGraw-Hill Interamericana de Chile LTDA.

# CAPÍTULO 9

## Biofísica termodinámica animal

*Daniela Olivera, Ana Julia Amasino, Julieta Pelosi, Roque Miranda*

La energía se puede presentar de diferentes formas: eléctrica, radiante, térmica, química, nuclear, entre otras, las cuales pueden ser interconvertidas. Es característico de todos los organismos vivos el intercambio continuo de energía con su medio ambiente. Todos los animales realizan trabajo y pierden calor, el trabajo lo realizan por ejemplo al nadar, arrastrarse y volar, como también al bombear sangre a través de los vasos del cuerpo. La rama de la física que estudia la relación entre el calor y las demás formas de energía se denomina *Termodinámica*.

### Calor y Temperatura

Calor es una magnitud física que permite calcular el intercambio de energía térmica entre dos sistemas que están a distintas temperaturas. Para que haya calor intercambiado es necesario que por lo menos dos cuerpos o partes de un sistema estén a distinta temperatura simultáneamente. Entonces el calor es energía en tránsito, ya que va de un lugar de mayor a otro de menor temperatura. Por otro lado, temperatura es la propiedad que indica el estado térmico de un sistema macroscópico, es una medida de la energía cinética promedio de las moléculas que forman el sistema.

Debido a que el calor es una forma de energía, las unidades de estas magnitudes son las mismas (Joule, ergio). Sin embargo, en la práctica es común utilizar para la medición del calor una unidad denominada caloría (cal), la cual se define como *la cantidad de calor necesaria para elevar en 1 °C la temperatura de 1 gramo de agua a presión atmosférica*. Este valor varía levemente dependiendo de la temperatura inicial del agua, con lo cual se define caloría 15, como *la cantidad de calor necesaria para elevar en 1 °C, desde 14,5 a 15,5 °C, la temperatura de 1 gramo de agua a presión atmosférica*.

## Ecuación general de la calorimetría

De lo expresado en el apartado anterior, surge que, si tenemos dos sistemas o un sistema y el medio ambiente a diferente temperatura, se presentará un flujo de energía en forma de calor que irá desde el sistema de mayor temperatura al de menor y cesará cuando ambos logren el equilibrio térmico (misma temperatura).

Para cuantificar el calor intercambiado por ambos sistemas se define la Ecuación general de la calorimetría, la cual se expresa matemáticamente como:

$$Q = c_e \cdot m \cdot \Delta T$$

Dónde:

Q: calor intercambiado (en calorías)

m: masa del sistema

$\Delta T$ : variación de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_f - T_i$ .

$c_e$ : calor específico, el cual se define como la cantidad de calor que hay que entregar a un gramo de sustancia para elevar su temperatura en  $1^{\circ}\text{C}$ . Esta magnitud es una constante que depende de la sustancia y su estado de agregación, por ejemplo, el hielo, el agua líquida y el vapor de agua tienen diferentes calores específicos. Se expresa en  $\text{cal/g}^{\circ}\text{C}$ .

Por lo tanto, si  $T_f$  es mayor que  $T_i$ , Q es positivo y expresa que el sistema absorbió calor, al contrario, si  $T_f$  es menor que  $T_i$ , Q es negativo y representa que el sistema entregó o cedió calor.

## Conservación de la energía: primer principio de la termodinámica

El Primer Principio de la termodinámica se basa en la Ley de Conservación de la Energía, establece que la energía se puede convertir de una forma en otra, pero no se puede crear ni destruir, es decir que "la energía del Universo permanece constante".

Los seres vivos son sistemas abiertos, ya que intercambian materia y energía con el ambiente. Cuando en un ser vivo ocurre un proceso determinado, la energía que se pierde o se disipa es igual a la que gana el ambiente. Este Primer Principio se pone de manifiesto, por ejemplo, a partir de la relación que se establece entre la energía química aportada por los alimentos y la energía que se transforma en calor y trabajo.

Visto de otra manera, si suponemos un sistema que sufre una transformación cíclica, es decir si va de un estado A a un estado B y luego retorna a su estado inicial (Fig. 9.1), independientemente del camino que siga en cada etapa, el calor absorbido es igual al trabajo realizado; expresado en forma de ecuación, resulta:

$$Q_L + Q_M = W_L + W_M$$

Donde:  $Q_L$  es el calor absorbido o cedido por el sistema al pasar del estado A al estado B.

$Q_M$  es el calor absorbido o cedido por el sistema al pasar del estado B al estado A.

$W_L$  es el trabajo realizado o que realiza el sistema al pasar del estado A al estado B.

$W_M$  es el trabajo realizado o que realiza el sistema al pasar del estado B al estado A.

Si lo expresamos en forma general, decimos *que la cantidad total de calor absorbida por un sistema en una transformación cíclica es igual al trabajo realizado por el mismo.*

$$\Sigma Q + \Sigma W = 0$$

Donde:  $\Sigma Q$  suma de todas las cantidades de calor (cedido y absorbido)

$\Sigma W$  suma de todas las cantidades de trabajo (realizado y recibido)

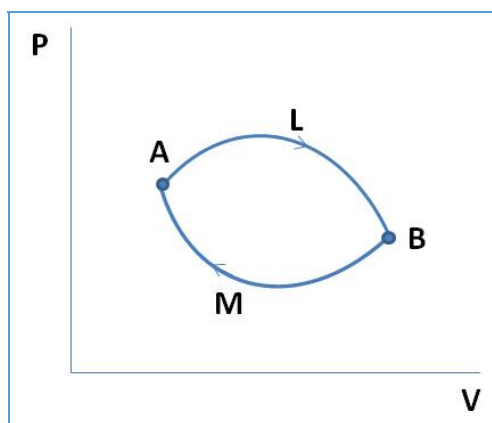


Figura 9.1: Representación de una transformación cíclica de un sistema.

## Energía interna y Entalpía. Ley de Hess

La energía total que tiene un sistema como consecuencia de la energía cinética de sus átomos, iones o moléculas y de la energía potencial que resulta de las fuerzas de interacción entre las partículas se denomina Energía Interna. Es imposible calcular su valor absoluto, sino que lo que se calcula es su variación, es decir cómo cambia cuando pasa de un estado a otro.

En la figura 9.2, presentamos un sistema que pasa de un estado A, a un estado B, por diferentes caminos. La diferencia entre el calor absorbido y el trabajo realizado al pasar de A a B es independiente del camino seguido por el proceso y queda determinado sólo por los estados inicial y final. Esta diferencia se denomina variación de la energía interna del sistema y se expresa como:

$$Q - W = \Delta E$$

A partir de ésta podemos ver que la Energía Interna,  $\Delta E$ , es una función de estado, es decir, sólo depende del estado inicial y final, y no del camino seguido para llegar a él.

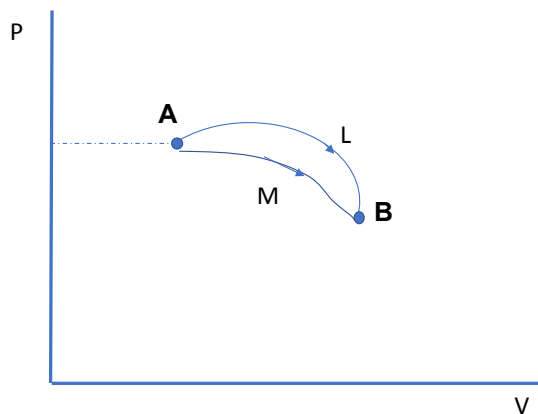


Figura 9.2: Diferentes caminos para pasar de un estado A a B

Otra función importante que surge a partir de la energía interna es la Entalpía, H, la cual representa la energía que un sistema puede intercambiar con el entorno, y es de suma importancia en el metabolismo energético.

Al igual que la energía interna, sólo puede calcularse su variación,  $\Delta H$ , y es independiente del camino que se hizo para ir de un estado al otro por ser también, una función de estado. La expresión de variación de entalpía es:

$$\Delta H = \Delta E + \Delta(PV)$$

Si el proceso es a presión constante:

$$\Delta H = \Delta E + P\Delta V$$

Reemplazando  $\Delta E$  por su expresión resulta:

$$\Delta H = Q - W + P\Delta V$$

Las variaciones de energía interna y de entalpía no sólo se pueden determinar en las transformaciones físicas, sino también a partir de reacciones químicas. En ese sentido la Ley de Hess menciona que “en una transformación química a presión constante y sin realizar trabajo útil, la cantidad de calor absorbida o desprendida está determinada únicamente por las sustancias iniciales y finales de la reacción y por los estados de las mismas y no depende de los pasos intermedios de la transformación”. Esta ley tiene aplicación directa en el cálculo de los calores de reacción de combustión que serían los aportes de energía de los alimentos al organismo animal.

## Segundo Principio de la termodinámica

El primer principio de la termodinámica trata de la transformación entre calor y trabajo, pero nada dice acerca de si el proceso ocurre espontáneamente o no.

El Segundo Principio enuncia que “es imposible obtener un proceso cíclico cuyo único efecto sea la transformación de calor en trabajo”. Resume el concepto en que, el calor no es transformable completamente en otra forma de energía, y dado que la energía total es la misma, ya que no se crea ni se destruye, sino que se transforma de una forma en otra, el calor va en aumento, al paso que las otras formas de energía, disminuyen. Esto otorga direccionalidad a los procesos físicos que conllevan la transformación de la energía: por ejemplo las tazas se caen de la mesa y se rompen, y no al revés. Este principio nos dice que

en las transformaciones reales hay disipación de la energía, que tiene que ver con el aumento de *Entropía*.

Entropía (S), es una función de estado que se relaciona con el grado de desorden de un sistema. La totalidad del calor entregado a un sistema no se transforma en trabajo, sino que parte se transforma en calor. Este calor no desaparece, sino que se va incrementando en la naturaleza, por lo tanto la entropía se expresa como:

$$\Delta S = \frac{Q}{T}$$

Donde Q: calor disipado

T: temperatura absoluta

Los seres vivos obedecen este segundo principio, porque, aunque el crecimiento espontáneo de los organismos implique un incremento del orden, esta evolución ocurre a expensas del gran incremento en el desorden del ambiente.

## **Necesidades de energía en el organismo**

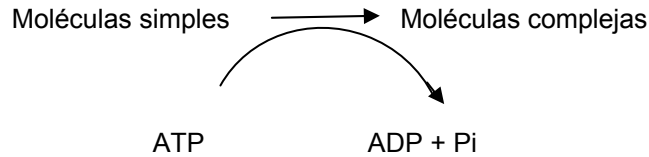
El organismo animal puede ser considerado como un sistema termodinámico abierto, que está continuamente intercambiando materia y energía con sus alrededores, consumiendo energía para desarrollar los trabajos internos y externos, y para fabricar moléculas estables para lo cual necesita alimentarse ingiriendo moléculas de gran energía libre que a partir de determinadas reacciones de combustión dan lugar a productos de menor energía.

## **Metabolismo energético**

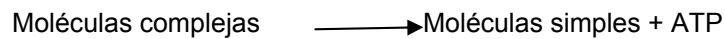
Como metabolismo energético se entiende al conjunto de reacciones bioquímicas y procesos físico-químicos que ocurren a nivel celular. Existen dos tipos de reacciones: anabólicas y catabólicas.

Las anabólicas son reacciones de síntesis, es decir, se parte de moléculas pequeñas para producir moléculas más complejas; las sustancias producidas se incorporan a las células para formar parte de la materia viva. Corresponden a una fase constructiva.





Por otro lado, las catabólicas son reacciones de descomposición, es decir, una macromolécula o molécula compleja se degrada para formar sustancias más simples y energía; las sustancias degradadas producen materiales de desecho que se eliminan del organismo. Corresponden a una fase degradativa.



### Metabolismo Basal

El metabolismo basal representa el consumo energético del organismo en estado completo de reposo físico y mental, es decir en condiciones de mínima demanda, en el que la energía que requiere se utiliza íntegramente para mantener las funciones propias de la vida vegetativa: respiración, circulación, contracciones intestinales, tono muscular, equilibrio térmico, etc. Esta magnitud se expresa en kcal por horas y por metro cuadrado de superficie corporal.

Las condiciones para su determinación son ayuno de 12 horas, reposo físico y mental, temperatura confortable.

El metabolismo basal puede ser determinado por dos métodos: calorimetría directa e indirecta.

**a) Calorimetría directa:** se basa en medir la cantidad de calor producido por el organismo animal durante un cierto tiempo. El animal se ubica dentro de una cámara adiabática llamada calorímetro de Atwater. El calor que libera el animal calienta el aire de la cámara; este aire caliente cede calor al agua fría que circula dentro del sistema de la cámara. Al determinar la temperatura del agua inicial y final, se puede calcular el calor absorbido por el agua, es decir cedido por el animal.

**b) 1- Calorimetría Indirecta por balance energético:** en este procedimiento, se determina la cantidad de calor desprendida por el organismo mediante la diferencia entre el valor calórico de los alimentos consumidos y el de las sustancias excretadas. Los resultados determinados mediante este proceso pueden ser inexactos debido a que el organismo puede quemar sus propias reservas además de los alimentos ingeridos por fijar parte de ellos como reserva.

**2- Calorimetría indirecta respiratoria:** es la más utilizada. En este caso, se mide la producción de calor del organismo a partir del oxígeno consumido y del CO<sub>2</sub> generado. Es decir, se basa en el ritmo de la utilización del oxígeno durante la combustión de los nutrientes celulares y del dióxido de carbono eliminado.

### **Poder calorífico. Poder calorífico fisiológico**

Se denomina poder calorífico a la cantidad de calor que libera 1g de una sustancia (hidratos de carbono, grasas y proteínas) cuando se oxida hasta su total conversión en anhídrido carbónico y agua (para hidratos de carbono y lípidos) o anhídrido carbónico, agua y productos nitrogenados (en el caso de las proteínas).

La determinación del poder calorífico se realiza mediante el uso de una bomba calorimétrica. La sustancia cuyo poder calorífico se desea determinar se coloca dentro de la bomba y se agrega el oxígeno necesario para la combustión. La bomba está rodeada de una camisa de agua que absorberá el calor liberado por la combustión. Todo esto se realiza dentro de un recipiente adiabático para evitar pérdidas de calor al exterior. La variación de temperatura del agua permite determinar el calor liberado por la combustión de la sustancia, es decir el poder calorífico. A partir de esta determinación es factible calcular el poder calorífico de los diferentes alimentos.

El poder calorífico fisiológico es la cantidad de calor producida por la combustión de una cierta cantidad de materia en el interior del organismo animal. En la tabla 9.1 se presentan los valores de poder calorífico obtenidos a partir de la bomba calorimétrica y fisiológica para hidratos de carbono, lípidos y proteínas. La diferencia que presentan las proteínas se atribuyen a que la combustión de las mismas en el organismo es incompleta, formándose urea que no se oxida y es excretada en la orina.

**Tabla 9.1: Poder calorífico obtenido a partir de la bomba calorimétrica y Poder calorífico fisiológico.**

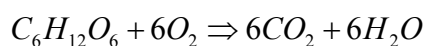
Compuesto	Bomba calorimétrica	Fisiológico
Hidratos de carbono	3,9-4,2 kcal/g	4,1 kcal/g
Lípidos	9,2-9,7 kcal/g	9,3 kcal/g
Proteínas	5,5-5,6 kcal/g	4,1 kcal/g

### Cociente respiratorio

Se define cociente respiratorio (CR) a la relación entre la cantidad de anhídrido carbónico producido, liberado durante la combustión y el oxígeno consumido durante la misma.

$$CR = \frac{\text{Cantidad de CO}_2 \text{ liberado}}{\text{Cantidad de O}_2 \text{ consumido}}$$

En el caso de los hidratos de carbono este valor resulta:



$$CR = 6/6 = 1$$

En cambio, para los prótidos y los lípidos al producir en su combustión una cantidad de CO<sub>2</sub> menor al oxígeno consumido, su cociente respiratorio es menor a la unidad, siendo el valor de CR 0,8 y 0,7 para proteínas y lípidos, respectivamente.

## Temperatura normal del cuerpo. Producción y pérdida de calor: mecanismos de transferencia

En los seres vivos los procesos biológicos se producen adecuadamente dentro de un determinado rango de temperatura, ya que, por ejemplo, cuando ésta es muy baja los procesos metabólicos se hacen muy lentos o se detienen y por el contrario, cuando es muy elevada, puede ocurrir una alteración de las enzimas que participan de los mismos. Debido a esto, ciertas especies animales desarrollaron la capacidad de mantener su temperatura corporal relativamente constante, dentro de un rango determinado, más allá de la temperatura que presente el ambiente en el que viven. Dichos animales son denominados “homeotermos” y dentro de los mismos podemos encontrar a las aves y a los mamíferos (Fig.9.3).



*Figura 9.3: Ejemplo de animales homeotermos: entre los animales homeotermos podemos encontrar a las aves, los mamíferos marinos y especies de mamíferos terrestres tales como los caninos, felinos, equinos y bovinos.*

En contraposición, denominamos como animales “poiquilotermos” a aquellos que no disponen de mecanismos que les permitan regular eficientemente su temperatura, por lo cual ésta varía dependiendo de las condiciones del medio en el que se encuentren. Son, por ejemplo, los peces, los reptiles, la mayoría de los invertebrados y los anfibios (Fig. 9.4). Estas especies, para poder regular su temperatura, deben tomar medidas de comportamiento tales como buscar la sombra cuando el calor es excesivo o entrar en un estado de aletargamiento para sobreponerse a climas muy fríos.



*Figura 9. 4: Ejemplo de animales poiquilotermos: entre los animales poiquilotermos podemos encontrar a los peces, a los reptiles y a los anfibios.*

Actualmente y debido a las limitaciones de esta clasificación, comenzó también a utilizarse una división de los animales en base a los medios de los que disponen para mantener su temperatura, dividiéndolos en “endotermos” y “ectotermos”. En los primeros, la fuente de producción de calor es interna y proviene principalmente del metabolismo oxidativo, mientras que en los segundos, la fuente es externa y proviene principalmente de la energía radiante del sol. En líneas generales, todos los animales homeotermos son endotermos, ya que para mantener su temperatura requieren de mecanismos eficaces de producción de calor y, por su parte, muchas especies de animales ectotermos son también poiquilotermos, ya que el ambiente determinará la temperatura que posean en sus cuerpos. De todas maneras, debemos tener en cuenta que las divisiones entre endotermia y ectotermia (o entre homeotermia y poiquilotermia) representan extremos ideales y que rara vez se encuentran en la naturaleza (Curtis, 2008).

No obstante mantenerse dentro de un rango que posibilite la vida, la temperatura corporal de los animales se ve modificada por diferentes motivos. Dentro de ellos podemos citar los siguientes:

- Momento del día: a la madrugada, los animales tienden a presentar menores temperaturas que a la tarde, debido a la disminución de su actividad fisiológica (actividad física, actividad digestiva debida a ingesta de alimentos, actividad endocrina, etc.) y por variaciones en la exposición a la radiación solar.

- Edad de los animales: la temperatura en los jóvenes es mayor que en los adultos, ya que los procesos de crecimiento y desarrollo se asocian a una mayor tasa metabólica, la cual genera una mayor temperatura corporal.

-Sexo: es otro factor, siendo ligeramente mayor la temperatura en hembras que en machos, variando según la actividad hormonal y el estado gestacional que éstas posean. En el caso de la actividad hormonal, en la mayoría de las hembras mamíferas, durante el proestro la temperatura desciende, luego se eleva durante el estro, desciende nuevamente en la ovulación y aumenta hacia la fase lútea.

-Tamaño corporal: a menor masa corporal, son menores los problemas para disipar el calor debido a la mayor relación superficie/volumen existente, siendo mayor también la producción de calor para mantener la temperatura.

Más allá de esto y en líneas generales, para conseguir el mantenimiento de la temperatura corporal debe existir un equilibrio entre los procesos de ganancia y pérdida de calor, ya que cuando el organismo produce más calor que el que pierde, este exceso se acumula dentro del cuerpo, aumentando su temperatura. Podemos definir entonces a los procesos de termogénesis como el conjunto de transformaciones que en el organismo generan calor, mientras que los procesos de termólisis son aquellos mediante los cuales el organismo es capaz de perder calor hacia el ambiente.

Cada especie animal posee un rango de temperatura ambiente en el cual los mecanismos termorreguladores no necesitan hacer mayores esfuerzos para mantener la temperatura corporal: es la denominada "zona termoneutral". Inmediatamente por debajo de dicho rango tendremos la "temperatura crítica inferior", a partir de la cual comienza a disminuir la actividad productiva del cuerpo, a la par que aumenta la tasa metabólica para generar calor, aumentando también el consumo de alimento. A su vez, en el límite superior del mismo, se encuentra la "temperatura crítica superior", a partir de la cual el animal busca aumentar la pérdida de calor a través de mecanismos tales como la sudoración, el jadeo y la vasodilatación cutánea (Fig. 9.5). En estos casos la regulación de la temperatura corporal de los animales homeotermos es regida mediante un sistema termorregulador eficiente, en el cual es fundamental el rol que juega una parte del cerebro, el hipotálamo. El objetivo de este sistema es modificar la temperatura corporal en función de la temperatura que haya en el ambiente. Pero si las condiciones son muy extremas, los mecanismos regulatorios pueden ser insuficientes y el cuerpo alcanzará temperaturas letales produciéndose la muerte por hipotermia o hipertermia.

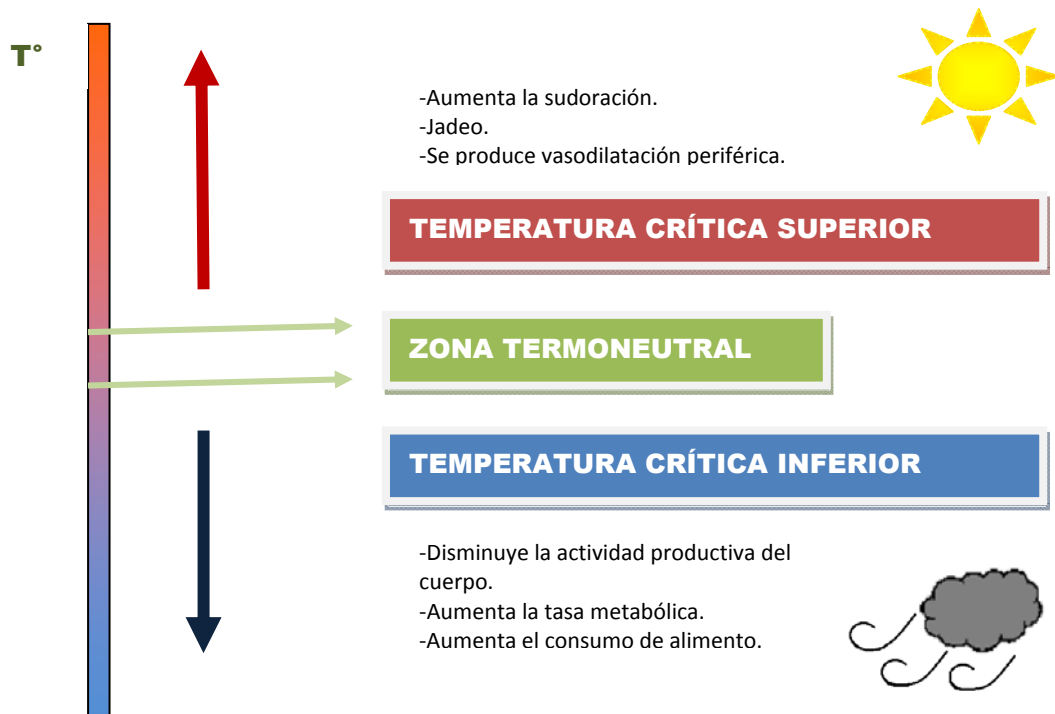


Figura 9.5: Esquema que representa la zona termoneutral. Por encima y por debajo de dicha zona de temperatura encontramos la temperatura crítica superior y la temperatura crítica inferior respectivamente.

## Mecanismos de producción de calor

Cuando la temperatura del exterior del cuerpo desciende, es necesario que el organismo aumente la producción de calor y disminuya su pérdida, con el fin de mantener su temperatura interna dentro del rango normal. Algunos animales poseen pelo, plumas o lana que actúan como aislantes térmicos. Además el cuerpo puede generar calor a través de la actividad muscular, el sistema hormonal (principalmente mediante la acción de algunas hormonas producidas por la glándula adrenal y tiroides) y el aumento de la tasa metabólica. Por lo general, al bajar la temperatura, la primera respuesta es disminuir las pérdidas de calor y lo siguiente es la activación de los mecanismos de termogénesis (Tabla 9.2).

## Mecanismos de disminución de las pérdidas de calor

En algunos animales, la presencia de una cubierta externa de pelo (en caninos y felinos por ejemplo) o lana (en ovinos), acompañada en muchos casos de piloerección, hace que el aire

que rodea al cuerpo quede atrapado, evitando así la pérdida de calor. Lo mismo sucede con las plumas de las aves. A su vez, si dichos animales presentan una importante capa de grasa subcutánea, ésta actúa como aislante, disminuyendo las pérdidas aún más. En cerdos y cetáceos, la presencia de dicha grasa subcutánea toma especial relevancia.

También muchas especies frente a las bajas temperaturas, adoptan diferentes comportamientos con el fin de evitar la pérdida de calor, por ejemplo agrupándose con otros animales (como es el caso de los pingüinos o las gallinas) o tomando posturas que disminuyan el área de exposición cutánea al ambiente.

Por último, la vasoconstricción periférica, al reducir el flujo sanguíneo en la piel, disminuye el gradiente de temperatura entre ésta y el ambiente, evitando así la pérdida excesiva de calor.

### **Mecanismos de aumento de la producción de calor**

Cuando la temperatura del ambiente disminuye, para compensar las pérdidas de calor, el organismo debe incrementar su metabolismo oxidativo y para ello también debe aumentar el consumo de alimento, ya que éste provee energía química que será liberada en los procesos metabólicos.

Además, mediante el escalofrío o tiritera el organismo puede producir calor, aparte del que puede generar la actividad física voluntaria. Éste es un aumento de las contracciones de los músculos estriados de tipo involuntario y que va acompañado de aumento del tono muscular. Este mecanismo es más eficaz para producir calor que el ejercicio físico, ya que se contraen músculos antagónicos y no se genera trabajo físico útil, por lo tanto la energía producida se transforma en calor. En general, en el músculo, el efecto mecánico del movimiento provoca en las fibras musculares el denominado "Efecto Joule", en el cual dicha fibra libera calor.

La secreción de adrenalina también se ve incrementada frente a las bajas temperaturas, ya que favorece la glucogenólisis hepática, mediante la cual el organismo obtendrá glucosa que será utilizada como fuente energética. Se produce además, un aumento de la secreción de tiroxina (T4), hormona que estimula la oxidación celular y la capacidad de absorción intestinal y que también potencia la acción calorígena de la adrenalina.

Finalmente en el cuello y espacio interescapular de algunos roedores, en los niños recién nacidos y en los mamíferos que hibernan encontramos la grasa parda, que es un tejido muy vascularizado que es capaz de producir calor de manera inmediata y en grandes cantidades. La adrenalina es un mediador para la activación de la termogénesis en dicha grasa.

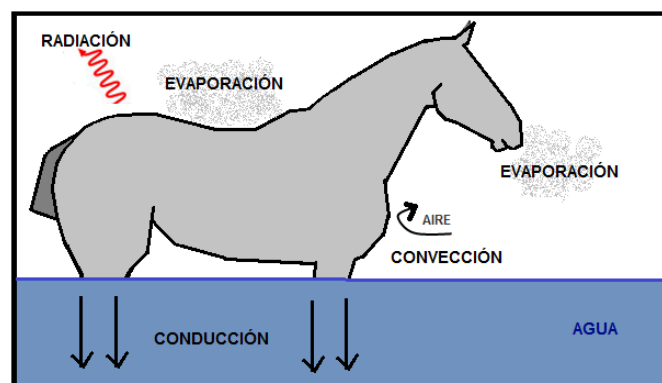


**Tabla 9.2: Mecanismos de disminución de las pérdidas y de ganancia de calor.**

Mecanismos de disminución de las pérdidas de calor	Mecanismos de ganancia de calor
<ul style="list-style-type: none"> <li>-Cubierta externa de pelo, plumas o lana.</li> <li>-Piloerección.</li> <li>-Presencia de grasa subcutánea.</li> <li>-Comportamiento postural y agrupamiento de animales.</li> <li>-Vasoconstricción periférica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Aumento del consumo de alimento y del metabolismo oxidativo.</li> <li>-Secreción de catecolaminas y hormonas tiroideas.</li> <li>-Escalofrío o tiritera.</li> <li>-Actividad física.</li> <li>-Termogénesis en grasa parda.</li> </ul>

### Mecanismos de pérdida de calor

La actividad en los órganos profundos (en particular hígado, cerebro y corazón), sumada a la actividad muscular, generan calor, el cual pasa posteriormente a la piel a través de los vasos sanguíneos gracias a la existencia de vasodilatación periférica. Luego se disipa al ambiente desde dicha superficie cutánea. Esta eliminación de calor desde la piel, es producto de mecanismos físicos que podemos clasificar en directos e indirectos. Dentro de los mecanismos directos, podemos enumerar la conducción, la convección y la radiación y dentro de los indirectos, la evaporación (sudoración y polipnea térmica) (Fig. 9.6). Hay que tener en cuenta que cuando la temperatura y la humedad son altas, los mecanismos de convección y evaporación son prácticamente inservibles y el sudor en lugar de evaporarse gotea, perdiendo su efecto.



*Figura 9.6: Mecanismos de pérdida de calor.*

## Mecanismos directos de pérdida de calor

**Radiación:** los seres vivos nos encontramos expuestos a todo tipo de radiaciones y nuestra piel es capaz de absorber en mayor o menor medida muchas de ellas. El color del pelaje de las diferentes especies influye en este proceso, ya que aquellos animales que poseen manto oscuro absorben mayor radiación que los claros, que tienden a reflejarla. A su vez, la piel también es capaz de emitir radiación con el fin de generar pérdida de calor, siendo el mismo eliminado del cuerpo en forma de ondas infrarrojas de entre 5 y 20  $\mu\text{m}$  de longitud de onda. De esta manera, el calor pasa del cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura, sin que entre ellos exista vínculo material. El calor es irradiado de esta forma en todas direcciones y constituye el 65 % de la termólisis total del cuerpo. Este mecanismo, depende del gradiente térmico que haya entre la piel y el medio que la rodea y de la superficie expuesta al intercambio, determinada por el área de superficie cutánea existente y la postura del animal (se pierde más calor estando de pie que echado), además de verse influenciado por la capacidad que tenga la piel para emitir o retener calor. Hay que tener en cuenta que no toda la superficie del cuerpo pierde calor por radiación ya que las partes que se enfrentan entre sí, al irradiarse mutuamente, no pierden energía.

**Conducción y convección:** La “conducción” y la “convección” son los mecanismos que desempeñan el menor papel en la termólisis.

En el caso del mecanismo de “conducción”, el calor se transfiere entre átomos y moléculas de objetos que se hallan en contacto, como energía cinética, dado que las moléculas se encuentran en movimiento en forma proporcional a la temperatura. Se produce cuando moléculas a mayor temperatura colisionan con moléculas de cuerpos más fríos, transfiriéndoles parte de su energía térmica de acuerdo al gradiente de temperatura que entre ellos exista. De este modo, hay un pasaje de calor desde los puntos de mayor temperatura a los de menor temperatura en los cuerpos sólidos, sin que haya desplazamiento apreciable de materia. El calor puede transmitirse de esta forma dentro de un mismo cuerpo o de un cuerpo a otro con el que se encuentre en contacto, variando según la conductividad térmica, el área de intercambio y la diferencia de temperatura que posean. En los equinos, por ejemplo, aunque la relación área de superficie/masa corporal es en general de cerca de 1/100, la relación es mayor en miembros, cabeza y cuello, siendo desde estas partes desde donde se realiza la mayor parte de la pérdida de calor por conducción.

Como la disipación de calor al medio ambiente por este mecanismo es mínima, teniendo en cuenta además que el aire es muy poco conductor del calor, cuando el clima es cálido, el animal puede controlar la pérdida de calor, por ejemplo, sumergiéndose en agua o pantanos o acostándose sobre superficies de menor temperatura.

Debemos tener en cuenta que en el caso de la conducción de calor desde la piel hacia la atmósfera, ésta se ve limitada cuando la temperatura de la piel se equipara a la del aire que la

rodea, excepto que el aire caliente se aleje de la misma, siendo este último mecanismo denominado “convección”. En el mismo, el calor se pierde gracias al movimiento del aire que rodea al cuerpo, ya sea por corrientes de aire o por movimiento del propio animal. Mediante este mecanismo cuando el aire contacta con la piel toma el calor de ésta y luego al renovarse se aleja del cuerpo llevándose consigo el calor absorbido. Es por ello que en invierno se siente más frío cuando el clima es más ventoso. Este proceso se encuentra influenciado por la diferencia de temperatura entre la piel y el aire ambiental, la velocidad del movimiento de este último y la postura que el animal presente.

**Intercambio de calor por contracorriente:** Además de los mecanismos enunciados anteriormente, en muchos seres vivos se produce en el interior del cuerpo, a través de la sangre, un mecanismo de intercambio de calor por contracorriente, que permite mantener un gradiente de temperatura a lo largo de algunos vasos sanguíneos que contactan entre sí. En los caninos, felinos, ovinos y bovinos, existe un sistema de este tipo mediante el cual se trata de evitar el aumento excesivo de la temperatura encefálica. En estas especies, la arteria carótida externa que lleva sangre a mayor temperatura hacia el encéfalo, contacta en su trayecto con las venas que traen sangre a menor temperatura desde las vías respiratorias altas, produciéndose entre ambos vasos sanguíneos intercambio de calor. De esta forma, la temperatura de la sangre que llega al cerebro puede ser 2 °C menor que la rectal. Este mecanismo de contracorriente también sirve en los animales para conservar el calor en algunas partes del cuerpo mientras disminuye en otras, por ejemplo, en las extremidades de algunos animales del ártico.

## **Mecanismos indirectos de pérdida de calor**

**Evaporación:** La evaporación es un mecanismo de pérdida de calor realizado a través de la piel por medio de la sudoración y/o a través de las vías respiratorias altas mediante el jadeo o polipnea térmica. Sobre ella influyen la temperatura de la piel, la humedad relativa del ambiente (a mayor humedad en el ambiente menos efectivo es el mecanismo de evaporación), el volumen minuto, la humedad del aire inspirado o espirado y la cantidad de agua disponible para ser evaporada.

Es un mecanismo indirecto de pérdida de calor, ya que el líquido depositado sobre la piel (sudor) o las vías respiratorias altas se calienta, pero no se verifica pérdida de calor hasta que el mismo se evapora totalmente de la superficie. En el caso del agua a 36°C, el calor de vaporización es de 578 calorías/gramo.

Las glándulas sudoríparas son, entre otras cosas, órganos termorreguladores exclusivos de los animales homeotermos y no todos ellos poseen la misma capacidad de emitir calor por sudoración, siendo los que poseen la mayor capacidad el hombre y los equinos, pues

presentan un mayor número de estas glándulas. En estos últimos, las glándulas sudoríparas apócrinas (aquellas que pierden parte de su sustancia protoplasmática durante la secreción y están asociadas a un folículo piloso) son grandes y se encuentran distribuidas en la superficie corporal, mientras que las écrinas (aquellas no asociadas al folículo y que secretan exclusivamente líquido) son pequeñas y están en menor cantidad en la crinera, cola, miembros y flanco profundo. Además, las glándulas poseedoras de una mayor irrigación, disponen a su vez de un plexo nervioso simpático circundante y generan una mayor sudoración y vínculo con los mecanismos disipadores de calor. Cabe destacar que los caballos son capaces de sudar en mayor cantidad de lo que lo hacen otros animales, por lo cual este mecanismo es muy eficaz para disipar calor en los mismos frente a elevadas temperaturas o ejercicio máximo.

En general, entre las diferentes especies es variable el número de glándulas sudoríparas presentes por unidad de superficie, siendo por ejemplo, de 30/cm<sup>2</sup> en los cerdos, mientras que en el cebú es de 2000/cm<sup>2</sup>.

El mecanismo de evaporación funciona constantemente pero se ve reforzado al acercarse la temperatura ambiente a la de la sangre. En los ambientes donde la temperatura es termoneutral hay una pérdida insensible de calor por sudoración leve y difusión de mínimas cantidades de agua desde las vías respiratorias y la mucosa bucal (perspiración). Dichas pérdidas se van incrementando al ir aumentando la temperatura. En los equinos las pérdidas desde las vías respiratorias y mucosa bucal colaboran con el 15 % de la pérdida de calor generada durante el ejercicio, mientras que el 85 % restante corresponde a la evaporación por sudoración (hay que tener en cuenta que el papel de la ventilación en la termorregulación de esta especie se incrementa con la duración del ejercicio).

El mecanismo corporal de evaporación se activa mediante receptores cutáneos que captan un aumento de la temperatura ambiente y/o cuando se produce un aumento de la temperatura de la sangre que circula por el hipotálamo y es controlado por el sistema nervioso simpático. Sólo las glándulas sudoríparas del hombre, el perro y los equinos y las de las plantillas digitales de gatos y roedores, responden a agentes parasimpático-miméticos, aunque el mecanismo es en esencia adrenérgico.

En el caso de muchos mamíferos, como los caninos, caprinos, ovinos y aves, que ven limitadas las pérdidas de calor a través de su piel, ya sea por poseer pelo, lana o plumas o por carecer de un número considerable de glándulas sudoríparas, toma especial relevancia el mecanismo de "jadeo" o "polipnea térmica", en el cual frente a un aumento de temperatura, aumenta la frecuencia respiratoria, mientras disminuye el volumen corriente de aire para poder eliminar calor manteniendo el volumen minuto estable dentro de los valores normales. Al jadear, el aire inspirado por la nariz es espirado por la boca y ese aire cálido espirado proveniente de los pulmones es eliminado junto con el vapor de agua de la mucosa bucal y nasal. En el caso de los perros, el mecanismo se hace más eficaz al sacar la lengua, dado que aumenta la superficie de intercambio con el entorno (Fig. 9.7) y en las aves colabora con éste, el aleteo gutural (movimientos oscilatorios rápidos de la pared ventral de la cavidad

bucal). Como fue citado anteriormente, se debe tener en cuenta que si la temperatura ambiente y la humedad relativa son muy elevadas este mecanismo pierde eficacia, llegándose a producir en muchos casos un golpe de calor, con la consiguiente muerte del animal si no es tratado a tiempo.

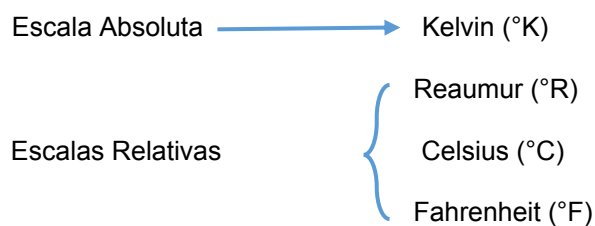


Figura 9.7: Mecanismo de pérdida de calor por jadeo en un canino adulto.

## Termometría

### Escalas termométricas

Existen dos tipos de escalas termométricas: las absolutas, que son independientes de la sustancia termométrica empleada o de un fenómeno físico, y las relativas, las cuales sí dependen de lo anterior.



#### Escala absoluta

- Escala Kelvin:

Descrita por William Thomson, más conocido como Lord Kelvin, en el año 1848, quien también desarrolló el Primer y el Segundo Principio de la Termodinámica, es la única escala absoluta. Su fundamento está dado en base a las consideraciones termodinámicas que parten de la ecuación de Van der Waals. En la misma el punto 0 de la escala, equivale a  $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , valor que se define como el cero absoluto,  $0^{\circ}\text{K}$ . Esta es la temperatura más baja posible, la cual es imposible lograrla en la práctica, ya que implicaría que las moléculas estén en un reposo absoluto. Considerando que la temperatura está relacionada con la energía cinética promedio del movimiento de sus moléculas, si un cuerpo tuviera  $0^{\circ}\text{K}$  sería incapaz de ceder calor. Como esto no es posible, cualquier cuerpo tiene una temperatura más alta al 0 absoluto.

Su relación con la escala Celsius se muestra en la fórmula siguiente:

$$^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273 \quad \text{o} \quad ^{\circ}\text{C} = ^{\circ}\text{K} - 273$$

### Escalas relativas

Las escalas relativas, a diferencia de la escala absoluta dependen de un fenómeno físico., para establecer sus valores.

- Escala Celsius (o centígrada):

Los puntos de referencia de esta escala son el punto de fusión ( $0^{\circ}\text{C}$ ), y el punto de ebullición ( $100^{\circ}\text{C}$ ) del agua pura a la presión atmosférica normal. Esta escala arbitrariamente está dividida en 100 partes iguales y es la de uso corriente en nuestro medio.

- Escala de Reaumur:

Utiliza los mismos fenómenos físicos (punto de ebullición del agua y de fusión del hielo) que Celsius, a los que les asigna los valores de  $80^{\circ}\text{R}$  y  $0^{\circ}\text{R}$  respectivamente. Esta escala se divide en 80 partes iguales.

- Escala Fahrenheit:

En esta escala, los valores máximo y mínimo se corresponden con el punto de ebullición del agua pura a una presión de 760 mm Hg, dándole un valor de  $212\text{ }^{\circ}\text{F}$ , y se le asigna el valor de  $0^{\circ}\text{F}$  a la temperatura de una mezcla de hielo y  $\text{CINH}_4$ . Esta escala es utilizada internacionalmente (es la unidad de temperatura del sistema anglosajón), por lo que hay que tenerla en cuenta ya que algunos aparatos vienen programados con ella, por ejemplo, las máquinas incubadoras en las plantas de incubación, en el caso de los reproductores de aves.

Relación matemática de las diferentes escalas relativas:

$$\frac{^{\circ}\text{C}}{100} = \frac{^{\circ}\text{R}}{80} = \frac{^{\circ}\text{F} - 32}{180}$$

A partir de esta ecuación podemos inferir las siguientes:

$$^{\circ}\text{C} = \frac{100}{180} \times (^{\circ}\text{F} - 32)$$

$$^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} \times (^{\circ}\text{F} - 32)$$

$$\frac{^{\circ}\text{C}}{100} = \frac{^{\circ}\text{R}}{80}$$

$$^{\circ}\text{C} = \frac{100}{80} \times ^{\circ}\text{R}$$

$$^{\circ}\text{C} = \frac{5}{4} \times ^{\circ}\text{R}$$

## Termometría

La termometría es la forma de medir la temperatura de las diferentes sustancias o cuerpos. La determinación de la temperatura corporal proporciona datos que son interpretados con fines diagnósticos y pronósticos, con lo cual debe ser evaluada en todos los animales al realizar un examen clínico. Clínicamente se pueden definir dos temperaturas corporales:

*Temperatura externa o superficial:* es subjetiva, se determina mediante la palpación con el dorso de la mano y en cualquier región del cuerpo. En general, suele ser 2 a 3°C menor que la temperatura interna, siempre que no exista un proceso local en la zona donde se evalúa la temperatura externa. Es muy dependiente de la temperatura ambiental. Las zonas de preferencia para evaluar la temperatura externa son las áreas de piel fina, con pocos pelos y poco expuestas a las radiaciones solares, como por ejemplo: axilas, zonas inguinales, base de las orejas o base de los cuernos, morro y extremidades. La temperatura superficial tiene un reparto desigual; en general las extremidades están más frías que el resto del cuerpo. Puede haber oscilaciones incluso bruscas dentro de una misma región en caso de hipertermia, especialmente en cuadros de fiebre. Tiene sólo un valor aproximado y nunca puede remplazar a la termometría clínica.

*Temperatura interna, o temperatura central:* se evalúa en zonas corporales donde la red vascular sea importante y no haya facilidad de entrada de aire ambiental. Clínicamente la temperatura central es sinónimo de temperatura rectal. Dicha temperatura se determina mediante el uso de los termómetros clínicos. Para el médico clínico este parámetro es de gran importancia, ya que con ella evaluamos el estado general del paciente. En el caso del organismo animal, midiendo su temperatura corporal por vía rectal, podremos saber si un animal está enfermo o sano (Fig. 9.8). En base a ésta, se llama *hipotermia* cuando la temperatura de un animal está por debajo del valor normal, e *hipertermia* cuando está por encima (Tabla 9.3). Pero no hay que confundir la hipertermia con la fiebre, ya que esta última es un síndrome que involucra muchos otros signos como la anorexia, el decaimiento, entre otros, dentro de los cuales está la hipertermia.

**Tabla 9.3: Rango de temperatura normal de diferentes animales domésticos**

<b>Especie</b>	<b>Rango de Temperatura Normal</b>
Equino	37,5 – 38,5 °C
Bovino	37,5 – 39,5 °C
Porcino	38,0 – 40,0 °C
Felino y Canino	38,0 – 39,0 °C
Aves	39,5 – 44,0 °C
Conejo	38,5 – 39,5 °C
Ovinos	38,5 – 40,0 °C

Para realizar la medición de la temperatura, como ya dijimos, se utilizan los termómetros. Existen diferentes tipos de termómetros. Algunos de ellos, se basan en las propiedades físicas de un líquido o sustancia termométrica que se dilata por acción del calor, otros como los digitales, se basan de transductores que utilizan circuitos electrónicos convirtiendo en números



pequeñas variaciones de tensión. Según su finalidad y las temperaturas obtenidas se pueden diferenciar varios tipos de termómetros, por ejemplo:

- *Termómetro de laboratorio o químico:* Está formado por un bulbo de vidrio que contiene como líquido termométrico al mercurio, que está unido a un capilar de vidrio. Sobre el mismo se encuentra la escala graduada. Cuando el mercurio se calienta, se dilata y comienza a ascender por el capilar hasta alcanzar el equilibrio térmico. En este momento se toma el dato de la temperatura, ya que una vez que se lo retira de la fuente calórica, el mercurio va a descender hasta la temperatura del ambiente donde se encuentre (Fig. 9.9 A).
- *Termómetro Clínico:* También llamado *termómetro de máxima*, ya que a diferencia del anterior, a la salida del bulbo, el capilar presenta un estrangulamiento que va a impedir que descienda la columna de mercurio una vez retirado de la fuente de calor. Este termómetro es el utilizado tanto en Medicina Veterinaria como en humana, por lo cual su escala tiene un rango útil de temperaturas que va desde los 35°C a 43°C. El mismo puede ser de mercurio o digital (Fig. 9.9 B).

El termómetro de veterinaria, se diferencia del utilizado en medicina humana porque posee un anillo u ojal de vidrio del lado opuesto al bulbo que contiene el mercurio, que le permite mediante una soga o hilo, retirar el termómetro en caso de que se complique el trato con el animal o se mueva en ese momento, pudiendo así evitar que el mismo quede en el interior del animal (Fig. 9.10 A).

- *Termómetro Registrador:* Permite conocer la temperatura en función del tiempo, es de gran utilidad para registrar las variaciones de temperatura en cámaras frías o en estudios meteorológicos.

- *Termómetro de máxima y de mínima:* En este caso, el cuerpo termométrico es el alcohol, que está interrumpido en la parte inferior del tubo por una columna de mercurio. En las dos ramas del tubo hay dos índices de vidrio coloreados que se desplazan. El termómetro lleva una doble graduación y las temperaturas son indicadas simultáneamente por los dos extremos de la columna de mercurio de un lado y del otro. El funcionamiento es el siguiente: posee dos ramas con un tubo y un índice cada una; cuando aumenta la temperatura, el alcohol del tubo 1 empuja la columna de mercurio y al contraerse, o sea al disminuir la temperatura, va a mover el mercurio en sentido contrario, de esta forma quedan indicadas las temperaturas máxima y mínima en un tiempo dado.

- *Termómetros de resistencia:* Consiste en medir el valor de la resistencia eléctrica y así conocer la temperatura. Este se basa en la propiedad que poseen los conductores eléctricos de aumentar o disminuir la resistencia eléctrica cuando varía la

temperatura. Un ejemplo es el termómetro de resistencia de platino, el cual tiene un coeficiente de temperatura de  $100 \text{ ohm}/^{\circ}\text{C}$ , es muy sensible y se utiliza generalmente en laboratorios donde se estudian descensos crioscópicos, por ejemplo, en el control de productos alimenticios como la leche.

- *Termómetro de temperatura interna y externa:* Es utilizado para medir la temperatura interna y externa de un determinado lugar. En la parte interna se coloca el termómetro, el cual mide la temperatura a partir de un sensor interno, y la temperatura del exterior es medida a partir de otro sensor ubicado en el extremo del cable. Con el mismo podemos observar la variación de temperatura en ambas zonas (Fig. 9.10 B).



Fig. 9.8: Medición de temperatura rectal en un cobayo macho con termómetro clínico digital



A

B

Fig. 9.9: A) Termómetro químico. B) Termómetros Clínicos, digital (superior) y de mercurio (inferiores)



Fig. 9.10:A) Termómetro utilizado en veterinaria con ojal en un extremo. B) Termómetro para temperatura interna y externa.

## Métodos de sujeción para la toma de temperatura

El manejo de los animales incluye, a veces, la necesidad de inmovilizarlos para que el veterinario realice en ellos las exploraciones o maniobras que considere oportunas.

Realizar la toma de parámetros (frecuencia respiratoria, cardíaca, temperatura, etc.) en forma segura para el paciente y el operador requiere de la sujeción del paciente. Esta maniobra no debe ser dolorosa y lo menos estresante posible para el animal, y se debe considerar la individualidad, ya que animales de una misma especie pueden tener respuestas opuestas ante la misma acción.

En la toma de temperatura el método de sujeción que se emplea en todas las especies es físico ya que la sujeción química (por medio de agentes anestésicos) no se utiliza por los riesgos que implica la anestesia y por la modificación de los parámetros del paciente que producen estos fármacos.

Dentro de los métodos físicos debemos hacer una diferenciación dependiendo de la especie y de la mansedumbre del animal.

### Sujeción para la toma de temperatura en grandes animales

**Bovinos:** la forma de defensa que tienen estos animales es topar y patear.

Los animales de producción lechera y de exposición se caracterizan por estar acostumbrados a la presencia del hombre. En el caso de las vacas lecheras, se le puede tomar la temperatura en el brete de ordeño del tambo, durante el ordeño sin mayores inconvenientes. Los animales de cabaña son sujetados generalmente mediante bozal y mocheta. Los bovinos

que no están dentro de los mencionados anteriormente, es decir los de rodeo a campo o feedlot (engorde a corral), son manejados en corrales, mangas o bretes. La manga es el lugar donde se puede realizar la toma de temperatura. En caso de animales muy indóciles se deberá utilizar el cepo.

Para pequeños rumiantes (ovinos y caprinos) bastaría con la sujeción manual por parte del operario.

**Equinos:** la sujeción en esta especie se realiza mediante un bozal y cabestro en animales dóciles. Considerando que una de las formas de defenderse del animal es pateando, esto se podría evitar elevando del suelo un miembro anterior del paciente, con ayuda de un operador, para de esta manera modificar su centro de gravedad; en la Figura 9.11 se presenta una fotografía de esta maniobra.

Otra forma de sujeción para pacientes pateadores, indóciles, es el potro de contención que consiste en cuatro postes verticales fijos unidos por dos laterales, una puerta de entrada y una de salida como se muestra en la Figura 9.12.

Cuando se trabaja con grandes animales con método de sujeción como bozal y cabestro, tanto el profesional como el asistente deben pararse ambos del mismo lado del paciente para que en caso de que este intente huir pueda hacerlo sin peligro de atropello.



*Figura 9.11: Maniobra para tomar la temperatura de equinos.*



*Figura 9.12: Imagen del potro de contención empleado en la clínica equina.*

### **Sujeción para la toma de temperatura en pequeños animales**

**Caninos:** la forma de defensa de estos animales es morder, con lo cual el uso de bozales es lo recomendable.

Bozales comerciales: tienen forma de cesta o canasta, permitiendo el jadeo del animal. Hay de diferentes formas y tamaños acorde al paciente a tratar.

Bozal de venda de gasa: bozal casero, se coloca realizando una lazada en el hocico y atándolo por detrás de las orejas. Se recurren a estos cuando en el consultorio se carece del bozal comercial. Para la toma de temperatura se sujeta de la base de la cola o pasando el brazo por debajo del abdomen.

**Felinos:** la forma de defensa de estos animales es la mordedura y el rasguño.

En los gatos en la clínica diaria se utiliza el método manual de sujeción, para ello se toma al animal por el pliegue de la nuca con una mano y con la otra, se toman fuertemente las patas traseras. Esto generalmente lo realiza un ayudante del veterinario mientras que el clínico podrá realizar la toma de temperatura. También se puede sujetar tomando al gato con una mano del pliegue de la nuca y la otra del pliegue lumbar, mientras que se mantiene presionado al animal contra la mesa (Fig. 9.13).

Otro recurso de sujeción consiste en envolver al felino en una toalla o lienzo de manera que solo quede al descubierto la parte posterior del mismo, mientras que las cuatro patas permanecen bien sujetas; esto generalmente, se realiza en los pacientes más indóciles.





*Figura 9.13: Maniobras de sujeción en felinos.*

## Referencias:

- Boffi F.M., Desmarás E. (2007). Termorregulación. En: F.M. Boffi *Fisiología del ejercicio en equinos. (1° edición)* (pp. 165-170). Buenos Aires: Edit. Inter-Médica.
- Castaño-Bello H. (1995). Termorregulación: Control y regulación de la temperatura corporal. En A. García Sacristán. *Fisiología Veterinaria (1° edición)*. (pp.1015-1024). Madrid: Edit. Mc Graw-Hill – Interamericana de España.
- Cisale H. (2014). Termodinámica. En: H. Cisale *Física Biológica Veterinaria (2° edición)* (pp. 13-46) Buenos Aires: Edit. Eudeba.
- Curtis H. (2003). Capítulo 44. Homeostasis II: La regulación de la temperatura. En H. Curtis *Biología. (6° Edición)*. CD Room. Buenos Aires: Edit. Médica Panamericana S.A.
- Frumento A. S. (1995). Capítulo 2: Termodinámica. En A. S. Frumento *Biofísica (3° edición)*. (pp. 31-54). Madrid, España: Mosby/Doyma Libros S.A
- Frumento A. S. (1995). Capítulo 3: Metabolismo energético. En A. S. Frumento. *Biofísica (3° edición)*. (pp. 55-70). Madrid, España: Mosby/Doyma Libros S.A
- Frumento A. S. (1995). Capítulo 19: Termorregulación. En A. S. Frumento. *Biofísica (3° edición)*. (pp. 365-372). Madrid, España: Mosby/Doyma Libros S.A
- González Ibeas J. (1974). Termodinámica del ser vivo. En: J. González Ibeas *Introducción a la Física y Biofísica. (1° edición)* (pp. 171-175).Madrid: Edit. Alhambra S.A.
- Guyton A y Hall J. (2011). Capítulo 73: Regulación de la temperatura corporal y fiebre. En C. A. Guyton & J. E. Hall. *Tratado de Fisiología médica. (12° edición)* (pp. 867-877). Barcelona: Edit. Elsevier.

# CAPÍTULO 10

## Biofísica de las principales radiaciones con aplicación en Medicina Veterinaria

*Ana Julia Amasino, Fernanda Coll Cárdenas, Julieta Pelosi*

Las *radiaciones* se definen como el transporte o propagación de la energía que se realiza en forma de partículas u ondas electromagnéticas. Muchas fuentes de radiación existen en la naturaleza, mientras que otras han sido creadas por el hombre con diversos fines: médicos, bélicos, industriales y otros. Los seres vivos constantemente estamos expuestos a irradiación externa (constituida por radiación cósmica y radiación naturalmente emitida por radionúclidos de la corteza terrestre) y radiaciones internas (debidas a radionúclidos incorporados con los alimentos, el agua y el aire inhalado). Generalmente, la acción sobre los tejidos de muchas de estas radiaciones puede no constituir necesariamente un riesgo para la salud, dependerá de la dosis y del tipo de radiación.

Dentro de las radiaciones, aquellas que poseen suficiente energía para producir una ionización (emisión de un electrón por parte de un átomo o molécula, quedando dicha partícula cargada), se denominan *radiaciones ionizantes*. Las partículas  $\alpha$  y  $\beta$ , los rayos X, los rayos  $\gamma$  y los neutrones pertenecen a este tipo. Debido a su gran energía, estas radiaciones son capaces de producir efectos biológicos importantes. Otro tipo de radiaciones, en tanto no tienen suficiente energía como para ser ionizantes; dentro de este grupo encontramos a la luz visible, las radiaciones infrarrojas, gran parte de las ultravioletas, las ondas de radio, las microondas, etc. y forman parte del espectro electromagnético descrito en el Capítulo 5, siendo conocidas como *radiaciones electromagnéticas*.

### **Algunos conceptos básicos**

Definiremos a continuación, algunos términos. Así, por ejemplo, llamamos “radiactividad” a la propiedad que poseen diferentes elementos inestables de emitir radiación para intentar



estabilizarse. Fue inicialmente estudiada en el radio (Ra), elemento que emite tres tipos de radiaciones al desintegrarse:  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ .

En ese mismo sentido, denominamos como “emisión radiactiva” a la proyección de partículas radiactivas por parte del núcleo de un elemento. Un ejemplo de esta sería la emisión de dichas partículas  $\alpha$  y  $\beta$ . Para comprender cómo se produce una emisión radiactiva, es importante conocer la estructura de los átomos que componen la materia y las características que poseen los isótopos radiactivos, que veremos a continuación.

## Estructura atómica. Isótopos radiactivos

Todo átomo está constituido por un núcleo rodeado por orbitales en los cuales encontramos electrones girando, con carga negativa (Fig. 10.1). Dicho núcleo, está compuesto a su vez, por protones y neutrones ligados por fuerzas nucleares. El protón posee una masa 1836 veces mayor que la del electrón y su carga es positiva, mientras que el neutrón, tiene una masa ligeramente superior a la del protón y no tiene carga. El átomo es considerado como eléctricamente neutro (o sea que se encuentra no-ionizado), cuando tiene igual número de protones en el núcleo que de electrones en sus orbitales.

Las órbitas en las cuales encontramos a los electrones representan distintos niveles de energía, siendo denominadas, desde el centro hacia la periferia, con las letras K, L, M, N, etc., y cuya energía aumenta al irse alejando del núcleo. A su vez, la diferencia energética entre órbitas contiguas va en disminución, siguiendo la misma dirección.

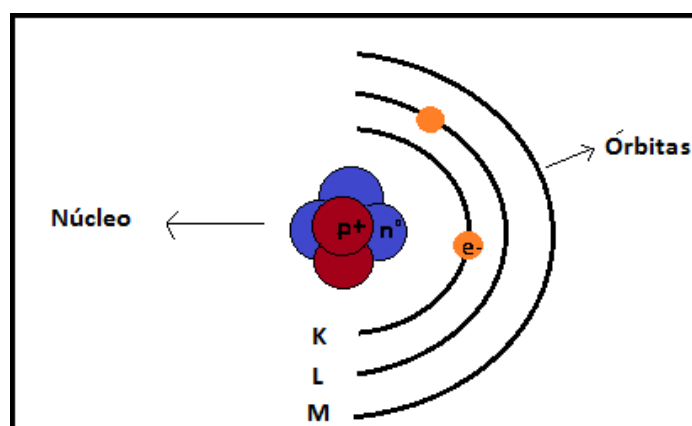


Figura 10.1: Esquema de un átomo

### Número atómico y número másico

Los distintos elementos conocidos se caracterizan y diferencian por poseer un determinado “Número atómico” (Z), que representa el número de protones presentes en el núcleo de los átomos que los constituyen. A su vez, la suma de protones y neutrones que componen el núcleo nos indica su “Número másico” (A). A mayor número másico, menor es la estabilidad de un núcleo. Es por ello que los elementos radiactivos tienen un elevado número másico.

Entonces:

Z = Número atómico = Número de protones presentes en el núcleo de un elemento.
A = Número másico = Número de protones + Número de neutrones presentes en el núcleo del elemento.

### Isótopos radiactivos

Ya se ha expresado que el número atómico (número de protones) es lo que caracteriza a un determinado elemento, dándole su lugar en la Tabla Periódica. A su vez, cada elemento puede presentar variantes llamadas *isótopos*, las cuales se diferencian entre sí en su número másico, es decir, en el número de neutrones que poseen; por lo cual definimos a los *isótopos* como aquellos elementos que tienen igual número atómico pero distinto número másico, ocupando el mismo lugar en la Tabla Periódica. Dichos isótopos pueden existir en la naturaleza o ser creados artificialmente. Por otro lado, algunos son estables y otros, en cambio, son inestables.

Los isótopos inestables son aquellos en los cuales hay un desequilibrio entre el número de protones y neutrones del núcleo. Para buscar la estabilidad, dichos elementos modifican espontáneamente su núcleo liberando materia o energía en forma de radiación. Son los denominados “*isótopos radiactivos*” y entre ellos podemos encontrar, por ejemplo, al  $U^{235}$  y  $U^{238}$ , al  $C^{14}$  y al  $I^{131}$  y  $I^{133}$ , etc. (Tabla 10.1).

**Tabla 10.1: Ejemplos de isótopos radiactivos**

<b>Isótopos naturales</b>	$U^{235}$ y $U^{238}$ $Rn^{222}$ $C^{14}$ $H^3$ $K^{40}$
<b>Isótopos artificiales</b>	$Cs^{134}$ , $Cs^{135}$ y $Cs^{137}$ $I^{129}$ , $I^{131}$ y $I^{133}$ $Co^{60}$

## Desintegración radiactiva

Cuando hablamos de “desintegración radiactiva” hacemos referencia a la transformación que sufre el átomo al emitir los diferentes tipos de partículas radiactivas. Ésta responde a las leyes estadísticas, sus propiedades son independientes de cualquier influencia del entorno y es característica de cada nucleído en particular (núcleo estudiado, sin hacer referencia al átomo del que forma parte). Esta actividad puede ser cuantificada a través de la “*Tasa de desintegración radiactiva*” y el “*Periodo de vida media*” que el mismo posea.

### Tasa de desintegración radiactiva

Aunque el fenómeno de desintegración radiactiva ocurre al azar y no se puede prever cuándo cada átomo va a desintegrarse, si tenemos un gran número de átomos, la fracción del total que se desintegra en la unidad de tiempo es constante para un isótopo dado. Podemos definir entonces a la “*Tasa de desintegración radiactiva*”, como el cociente entre la masa desintegrada (M) y el tiempo que ésta tarda en desintegrarse (t).

Como la variación de la masa del elemento que se desintegra es negativa y, a su vez, la velocidad de desintegración decrece en forma continua a medida que disminuye la masa del elemento que se está desintegrando, la tasa de desintegración (v) queda expresada como:

$$v = -\frac{\Delta M}{\Delta t}$$

Siendo:  $\Delta M$  = variación de la masa;  $\Delta t$  = variación del tiempo.

Esta tasa de desintegración puede ser expresada en gramos, moles o número de átomos por unidad de tiempo (en este último caso se la denomina “actividad”).

Partiendo entonces del concepto anteriormente enunciado, definimos como “*Actividad*” (A), al número de núcleos atómicos que se desintegran en la unidad de tiempo (velocidad de desintegración) y es proporcional al número de átomos radiactivos presentes:

$$A = -\frac{\Delta N}{\Delta t}$$

Siendo:  $\Delta N$ = variación del número de núcleos atómicos desintegrados;  $\Delta t$ = variación del tiempo.

Teniendo en cuenta que la actividad disminuye siguiendo una función exponencial del tiempo, esta característica queda mejor definida con la siguiente fórmula:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Siendo:  $A_0$ = actividad de una fuente a tiempo cero ( $t_0$ );  $A$ = actividad después de un tiempo  $t$ ;  $\lambda$ = constante de desintegración radiactiva (probabilidad que tiene un átomo del radioisótopo considerado de desintegrarse en la unidad de tiempo);  $e$ =base de los logaritmos neperianos (valor aproximado de 2,7182);  $t$ =tiempo.

Anteriormente, la unidad utilizada para medir la actividad de una muestra radiactiva era el Curie (Ci), siendo 1 Ci la cantidad de sustancia radioactiva que presenta una velocidad de desintegración de  $3,7 \times 10^{10}$  desintegraciones por segundo. Actualmente, es recomendado por la ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements) el uso del Becquerel (Bq) como unidad del S.I., siendo 1 Becquerel equivalente a 1 desintegración por segundo; como esta es una unidad muy pequeña, generalmente suelen utilizarse sus múltiplos (MBq, GBq, TBq, etc.).

Entonces:

1 Ci =  $3,7 \times 10^{10}$  desintegraciones/seg.

1 Bq = 1 desintegración/seg

### **Periodo de semi-desintegración, semiperiodo o periodo de vida media**

Se define como "*Período de semi-desintegración*", "*Semiperiodo*" o "*Periodo de vida media*" (T), al tiempo necesario para que un número de átomos de un elemento radiactivo se reduzca a la mitad de su valor inicial. Este valor es independiente de la masa inicial del elemento radiactivo y abarca un vasto rango para las diferentes especies radiactivas, por ejemplo es de 0,012 segundos para el  $N^{12}$ , mientras que para el  $C^{14}$  es de unos 5700 años.

## Interacción de las radiaciones con la materia

La radiación es energía; al interactuar con la materia, entrega parte de su energía y puede producir cambios a nivel molecular. Estos cambios, pueden ser, principalmente de *ionización* o de *excitación*.

En el caso de las radiaciones ionizantes, al poseer una elevada cantidad de energía, como expresamos anteriormente, cuando encuentran en su camino átomos y moléculas de la materia, pueden llegar a romper estos enlaces atómicos, liberando electrones de los mismos, produciendo así la *ionización*; los electrones liberados, a su vez, podrán seguir repitiendo este proceso, si es que cuentan con la suficiente energía.

En otros casos, las radiaciones transfieren parte de su energía acumulada a los átomos o moléculas con los que interactúan, dejándolos en un estado de mayor energía, proceso que se conoce como *excitación*, pudiendo, luego de desexcitarse, seguir emitiendo más radiación.

En el caso particular de las radiaciones electromagnéticas, pueden ocurrir los dos procesos (*excitación e ionización*) que conllevan a la aparición de modificaciones estructurales. Si se produce *excitación*, podrá, por ejemplo, aparecer un aumento de la velocidad angular de la molécula debida a la acumulación de energía en forma de energía cinética de rotación provocando la rotación molecular; también, ocurrir vibraciones atómicas o la modificación de la configuración electrónica; en tanto, como consecuencia de la *ionización*, se ocasionarán la formación de pares, que tiene lugar cuando el fotón pasa cercano a un núcleo, lo que provoca que su energía desaparezca dando origen a un electrón y un positrón; el efecto fotoeléctrico, que produce que un electrón orbitario pueda ser, no sólo elevado de nivel energético sino además, arrancado del átomo y proyectado con una cierta velocidad o el efecto Compton, ocurrido cuando el fotón que incide tiene una mayor energía, la cual no sólo provoca que el electrón sea arrancado y proyectado del átomo, sino también que el exceso de energía sea emitida en forma de una radiación electromagnética de menor frecuencia. Como ya dijimos, en cualquiera de estos tres últimos eventos, la consecuencia final será la formación de partículas cargadas, o sea iones.

## Radiaciones corpusculares y electromagnéticas

Las radiaciones pueden clasificarse en dos grandes grupos: radiaciones materiales, de partículas o corpusculares (aquellas que poseen carga y masa) y radiaciones electromagnéticas (aquellas que poseen propiedades de corpúsculo y onda y cuya masa en reposo es nula).

Dentro de las primeras podemos encontrar, por ejemplo, a las partículas  $\alpha$ ,  $\beta$  y a los neutrones. Dentro de las electromagnéticas encontramos los rayos X y  $\gamma$ , entre otros. En

general, las sustancias radiactivas, suelen emitir comúnmente partículas  $\alpha$ ,  $\beta$  y rayos  $\gamma$  en mayor o menor proporción.

## Radiaciones materiales, de partículas o corpusculares

Como fue referido anteriormente, cuando el núcleo de un átomo se encuentra inestable trata de ganar estabilidad emitiendo partículas y transformándose, de esta manera, en otro núcleo. Dichas partículas subatómicas emitidas, que se caracterizan por poseer una determinada masa en reposo y carga, son las denominadas “radiaciones materiales, de partículas o corpusculares”. Además, dichas partículas pueden tener diferente energía, al estar animadas de diferentes velocidades.

### Partículas $\alpha$

Son partículas con una gran estabilidad, emitidas por un elemento radiactivo generalmente pesado, como el uranio, el torio o el radio. En la reacción también es liberada energía, denominada “valor Q” (energía de desintegración).

Se caracterizan por poseer carga positiva, equivalente al doble de la carga del electrón, ya que están constituidas por dos neutrones y dos protones, siendo por ello similares a un núcleo de Helio (Fig. 10.2). Un elemento radiactivo al emitirlos se convierte en otro elemento diferente, dado que cambia su número atómico, por lo cual perderá dos lugares en la Tabla Periódica.

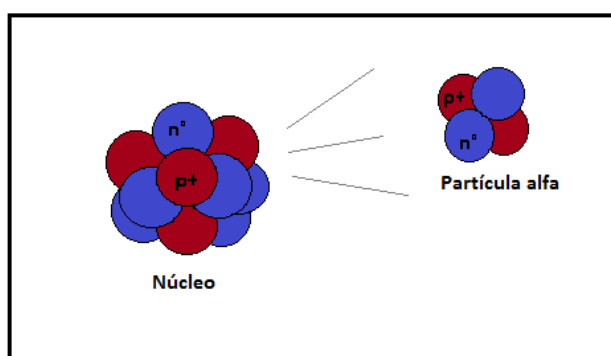


Figura 10. 2: Emisión de partícula alfa.

Como poseen una gran masa ( $6,68 \times 10^{-27}$  kg) y carga positiva, su capacidad de penetración es baja y se detienen al atravesar unos cm de aire, siendo frenadas por una hoja de papel o la piel humana. A su vez la velocidad que poseen es relativamente baja (del orden de los 20.000

km/seg) y tienen un gran poder de ionización. De este modo, cuando una partícula  $\alpha$  no pasa demasiado cerca del electrón de un átomo, lo eleva de nivel energético y el átomo queda excitado; cuando dicho electrón vuelve a su órbita inicial emite el exceso de energía como radiación electromagnética. Si la partícula  $\alpha$ , en cambio, pasa lo suficientemente cerca es capaz de arrancar el electrón, dando lugar a la formación de un par de iones. Una partícula  $\alpha$ , en su trayecto, es capaz de generar 200.000 pares iónicos.

Al tener escaso poder de penetración y actuar sobre células en reproducción, se utilizaron inicialmente para tratar tumores de piel, pero al ser causantes de quemaduras su uso fue limitado. Otros usos que se les da son en la industria textil y en fábricas de películas plásticas, con el fin de neutralizar la electricidad estática que se producía en los materiales por rozamiento; también en las baterías de los marcapasos cardíacos; en los detectores de humo; en las boyas de la guardia costera, a partir de la generación de estas partículas por medio de los diferentes elementos como el  $\text{Po}^{210}$ ,  $\text{Sr}^{90}$  o el  $\text{Pu}^{238}$ .

Debido a que, junto con las partículas  $\beta$ , producen fenómenos de luminiscencia en algunos materiales, fueron utilizadas también para obtener productos para la señalización de aviones, barcos, trenes, etc.

### **Partículas $\beta^+$ y $\beta^-$**

Según la carga que posean, las partículas  $\beta$  pueden ser positivas (positrones) o negativas (negatrones).

Las partículas  $\beta^-$  (negatrones) se forman cuando se produce la desintegración espontánea de neutrones de átomos radiactivos. En este caso, el neutrón del núcleo, queda convertido en un protón y un electrón, siendo este último eliminado violentamente del núcleo, dando origen a estas nuevas partículas (Fig. 10.3). El número másico del elemento permanecerá constante, mientras que el número atómico cambia, transformándose en el siguiente elemento más pesado de la Tabla Periódica. Además, en la reacción, también es emitido un "antineutrino" (partícula sin masa ni carga, que no tiene significancia biológica). Tanto el negatrón, como el antineutrino son creados por un exceso de energía.

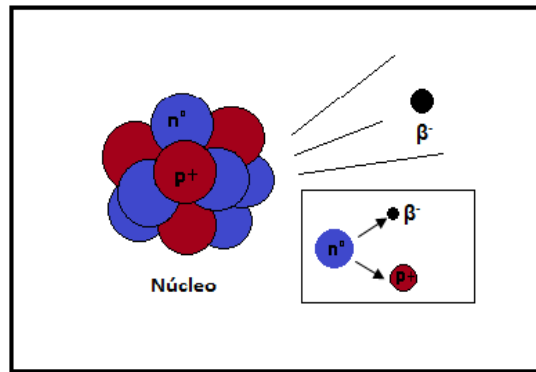


Figura 10.3: Emisión de partículas  $\beta^-$ .

La masa de estas partículas  $\beta^-$  es equivalente a la de un electrón y su poder de penetración es mayor que el de las partículas  $\alpha$ , considerándose como moderadamente penetrantes. En cuanto a su velocidad, es relativamente alta (similar a la velocidad de la luz en el vacío) y poseen un poder de ionización más bajo que las partículas  $\alpha$ , considerándose también como moderado. Debido a su carga negativa, son desviados hacia el polo positivo en un campo magnético.

Estas partículas fueron usadas para destruir células tumorales en tejidos profundos, pero luego su uso con este fin, fue disminuyendo. Ejemplos de emisores de partículas  $\beta^-$  son el Tritio ( $H^3$ ) y el Carbono 14 ( $C^{14}$ ), entre otros.

En cuanto a las partículas  $\beta^+$ , éstas son producto de la acción de deuterones, partículas  $\alpha$  o neutrones rápidos sobre distintos elementos. En este caso, un protón del núcleo se convierte en neutrón, emitiendo un positrón junto con un neutrino (al que consideraremos a estos fines, similar al antineutrino, anteriormente mencionado) (Fig.10.4). El positrón es una partícula de tipo elemental cuya carga eléctrica es similar a la de un electrón, pero con signo positivo. El número másico de ese elemento, también permanece constante, pero no así el número atómico, con lo cual cambia el elemento. Tal el caso de lo que ocurre con la desintegración del Carbono 11 ( $C^{11}$ ) que se transforma en Boro 11 ( $B^{11}$ ) al emitir una partícula  $\beta^+$ .

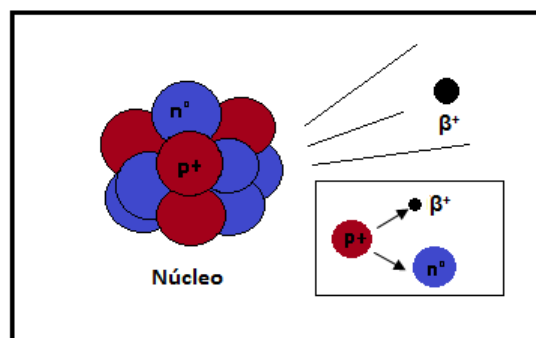


Figura 10.4: emisión de una partícula  $\beta^+$ .

Como dijimos anteriormente, el positrón emitido es equivalente a un electrón, pero con carga positiva. Su masa, por tanto, es similar a la de éste e interactúa con la materia de forma



semejante. Las partículas  $\beta^+$  poseen un poder de penetración y de ionización moderado, al igual que las  $\beta^-$ . Ambas recorren en el aire una distancia de aproximadamente un metro y son detenidas por láminas de vidrio, madera o metal.

Estas partículas son utilizadas en la técnica PET (Tomografía por emisión de positrones), usada como método complementario de diagnóstico en la clínica, que será descrita más adelante, en este mismo capítulo.

## Neutrones

Son partículas que no poseen carga. En átomos con exceso de neutrones, éstos son simplemente expulsados del núcleo. Producen ionización en forma indirecta, ya que, al interactuar con los átomos de la materia, se originan rayos  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , o X, que causan, a su vez, ionización. Son muy penetrantes (sólo pueden ser detenidos por una gruesa pared de hormigón) (Fig. 10.5).

Ejemplo de isótopos emisores de neutrones son el Berilio 13 ( $\text{Be}^{13}$ ) y el Helio 5 ( $\text{He}^5$ ).

## Radiaciones electromagnéticas

Como ya expresamos en el Capítulo 5, las radiaciones electromagnéticas están compuestas por ondas que pueden propagarse en el vacío, con una velocidad de 300.000 km/seg. Dichas ondas están asociadas a un campo eléctrico y otro magnético que vibran en planos perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación de la onda y son clasificadas como ondas transversales. Además de sus propiedades de onda, estas radiaciones poseen propiedades de corpúsculo ya que el elemento base que las constituye son los cuantos o fotones de energía.

Las radiaciones electromagnéticas se diferencian entre sí, por su frecuencia ( $\nu$ ) y, por ende, también, en base a su longitud de onda ( $\lambda$ ), siendo ésta última inversamente proporcional a la primera. Además, las radiaciones que poseen mayor frecuencia, cuentan también con una mayor energía, de acuerdo a la ecuación de Planck, descrita en el Capítulo 5. Es por eso que dichas radiaciones, tal el caso de los rayos  $\gamma$ , son capaces de ionizar tejidos, mientras que en aquellas donde la frecuencia es baja, como los rayos infrarrojos, no llegan a tener energía suficiente para producir este efecto.

## Rayos gamma ( $\gamma$ )

Cuando el núcleo de un determinado elemento emite partículas  $\alpha$  o  $\beta$ , queda generalmente excitado (dado que sus protones y neutrones no se ubican en la posición de mínima energía). Para volver a la normalidad, una de las posibilidades que tiene es emitir este exceso de energía en forma de radiación  $\gamma$ . La emisión de este tipo de radiación no supone un cambio en el elemento del que proviene, puesto que la composición de su núcleo no varía.

Estas radiaciones nucleares se caracterizan por poseer una elevada frecuencia y por ende alta energía (mayor a 100 eV). Su poder de penetración es también, alto y apenas llegaría a detenerlos una pared gruesa de plomo u hormigón (Fig. 10.5). Como su velocidad es similar a la de la luz, su poder de ionización es bajo.

Este tipo de radiaciones son utilizadas para la conservación de alimentos, tales como papas, cebollas, frutas, jugos, etc. y para la esterilización de material quirúrgico. También son aplicados en métodos diagnósticos como ser en Centellografía, Gammagrafía y la Tomografía por emisión de positrones (PET) y en el tratamiento de algunos tipos de tumores, a partir de radioterapias. Uno de los principales elementos generador de estos rayos es el  $\text{Co}^{60}$ .

## Rayos X

Durante sus investigaciones con los denominados “tubos de Hittorf - Crookes” en 1895, el físico alemán Wilhelm Conrad Roentgen descubrió una nueva radiación, a la que denominó rayos X y ese mismo año consiguió obtener la primera radiografía, una imagen de la mano de su esposa.

Posteriormente se comprobó, por medio de estudios físicos, que los rayos X son ondas electromagnéticas invisibles para el ojo humano, con una longitud de onda de alrededor de 1 Å, que se ubican en el espectro de frecuencias entre los rayos ultravioleta y los rayos gamma.

Estos rayos poseen dentro de sus características la capacidad de impresionar y producir imágenes sobre películas fotográficas, provocar en algunos casos efecto Compton y efecto fotoeléctrico, que definimos anteriormente, y generar fluorescencia al actuar sobre ciertas sustancias (por *excitación*). Además, su modo de propagación es en línea recta y, al no poseer carga, no son desviados por campos eléctricos ni magnéticos. Tampoco son desviados por lentes.

En cuanto a su efecto sobre los tejidos, son radiaciones ionizantes de alta energía, capaces de producir mutaciones y cuyo poder de penetración es alto, aunque menor que el de los rayos gamma, es por ello que suele utilizarse el plomo como elemento de protección frente a los mismos (Fig. 10.5).

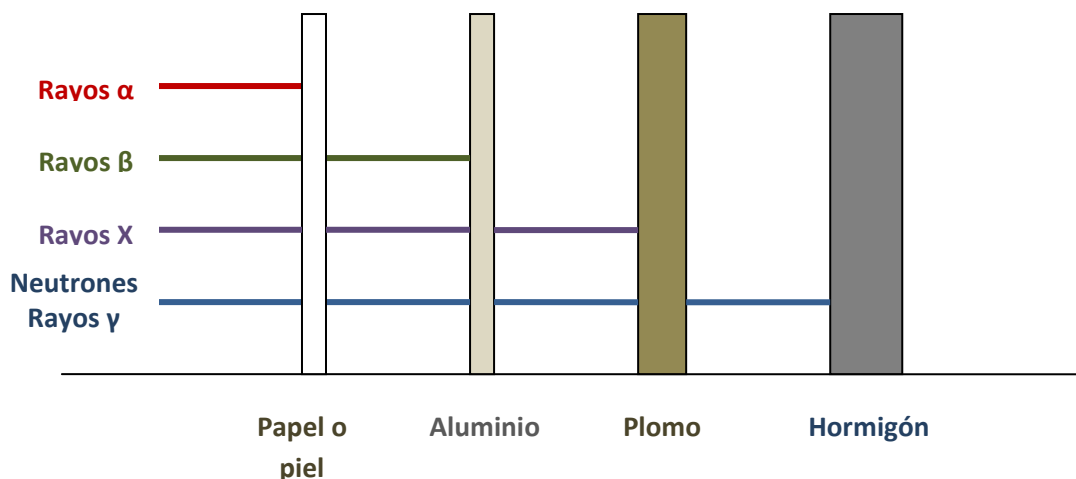


Figura 10.5: Poder de penetración de las diferentes radiaciones.

Para su producción se utiliza un tubo de rayos X, como el tubo de *Coolidge* (Fig. 10.6), que consta de una ampolla de vidrio tipo pyrex, en cuyo interior se genera vacío. En uno de sus extremos posee un filamento metálico (generalmente de tungsteno), que actúa como cátodo, al que se le aplica una determinada diferencia de potencial para generar una corriente de entre 5 y 1200 miliamperes de intensidad, la cual, por efecto termoiónico, permite la producción de electrones (los electrones de las capas externas del filamento quedan dispuestos como una nube adyacente a su superficie). En el extremo opuesto posee un blanco o anticátodo, elaborado con un material de elevado número atómico. Entre el cátodo y el anticátodo se genera una diferencia de potencial denominada “potencial acelerador”, que hace que los electrones que produce el filamento (polo negativo o cátodo), sean atraídos hacia el blanco (polo positivo o anticátodo). Este potencial varía según la aplicación que se le vaya a dar a la radiación producida y cuanto mayor sea, más veloces serán los electrones emitidos hacia el anticátodo (por lo tanto, tendrán mayor energía cinética). De la interacción entre los electrones acelerados y el blanco surgirán los rayos X y se producirá, además, energía calórica. Teniendo en cuenta lo anterior, podemos decir que el tubo de Coolidge es de muy bajo rendimiento, ya que un 99% de la energía se libera en forma de calor, mientras que tan sólo un 1% es convertido en radiación.

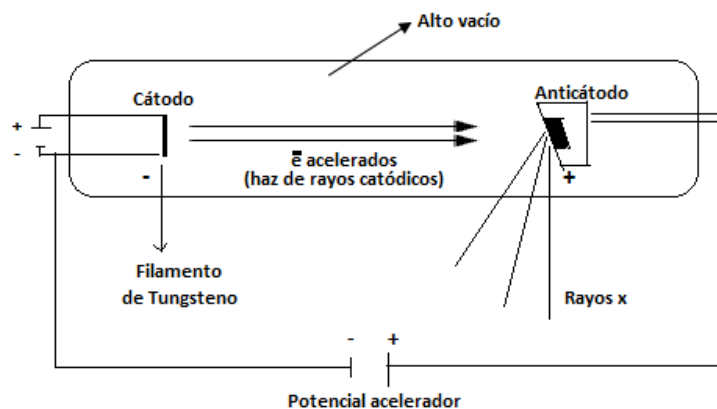


Figura 10.6: Tubo de Coolidge.

## Clasificación de los rayos X

### Por su origen

Dentro de los rayos X podemos encontrar dos tipos: “rayos X característicos” y “rayos X por frenado de electrones” (Fig. 10.7). En el primer caso, los electrones acelerados producidos en el tubo de Coolidge tienen suficiente energía para extraer de un átomo del blanco, un electrón de los niveles energéticos inferiores (K o L). El espacio vacante es ocupado entonces, por un electrón de un nivel energético superior y al producirse este salto, la energía excedente (perdida por el electrón que estaba en el nivel superior), es liberada en forma de rayos X característicos. La longitud de onda de estos rayos es definida y se corresponde a cada salto orbital, por ende, su espectro es “discontinuo” y depende de los niveles energéticos de los átomos del metal que constituye el anticátodo.

En el caso de los “rayos X por frenado de electrones”, se producen cuando los electrones acelerados logran interactuar con el campo electromagnético de los núcleos de los átomos que constituyen el blanco, por pasar cerca de éstos. En este caso, la interacción con el núcleo hace que el electrón cambie de dirección y gire parcialmente alrededor de él. Esto genera una pérdida de velocidad del mismo (frenado), que produce a su vez, una pérdida de energía que es emitida como rayos X. La longitud de onda de este tipo de radiaciones depende de la distancia que haya entre la dirección del electrón y la posición que tenga el núcleo en el momento de la interacción, lo que se denomina “parámetro de impacto”. Para estas radiaciones el espectro es continuo, ya que, a partir de una longitud de onda mínima dada por el choque frontal del electrón contra el núcleo del átomo, todos los valores de longitud de onda son posibles. Este tipo de rayos X son los más utilizados para el diagnóstico radiográfico.

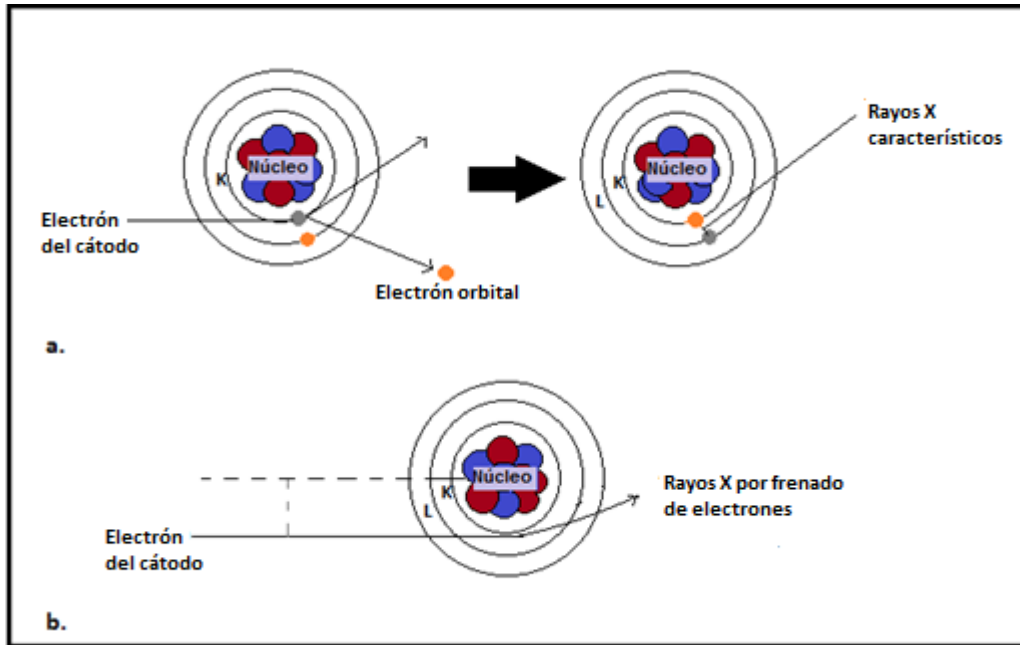


Figura 10.7: a. Formación de rayos X característicos. b. Formación de rayos X por frenado de electrones.

### Por la longitud de onda

En este caso, podemos encontrar también dos tipos. Aquellos cuya longitud de onda es mayor a  $0,5 \text{ \AA}$  son denominados “blandos”, mientras que cuando su longitud de onda es menor o igual a dicho valor, aparecen los rayos “duros”. Los primeros, se caracterizan por poseer poco poder de penetración y alto poder de ionización, siendo capaces de provocar quemaduras en tejidos superficiales y debiendo por ello, ser filtrados de la radiación cuando se efectúan placas radiográficas. Los segundos, poseen como característica su gran poder de penetración y su capacidad de producir mutación del ADN en células en mitosis activa. Estos rayos, tienden a interactuar principalmente con tejidos de rápida reproducción y son utilizados en terapia profunda, además de usarse como método de diagnóstico por imágenes.

En general, los rayos X son empleados en técnicas de diagnóstico de diferentes patologías mediante radiografía, radioscopia y tomografía y así también, para el tratamiento de ciertos tumores. Además, anteriormente, eran usados para eliminar la carga bacteriana y/o viral de elementos tales como alimentos empaquetados, vendajes quirúrgicos y similares, pero actualmente han sido reemplazados por los rayos gamma.

## Uso de los Rayos X en Medicina Veterinaria

En la práctica diaria, los rayos X son de mucha ayuda tanto para el diagnóstico como para el tratamiento de algunas patologías, si bien el uso como método complementario es el más utilizado actualmente, cada vez se está profundizando más la aplicación de las radiaciones con fines terapéuticos, en las denominadas radioterapias.

### Rayos X como método complementario de diagnóstico

Existen varios métodos complementarios de diagnóstico por imágenes, que ayudan al veterinario clínico a llegar a un diagnóstico definitivo.

Los más utilizados son las radiografías y las tomografías computadas, y aunque la primera es la más usada en la actualidad, la segunda está adquiriendo cada vez mayor importancia ya que nos brinda una mayor información.

Ambas se basan en la utilización de rayos X y en su capacidad para impresionar en películas radiográficas.

### Radiografías

La radiografía es un método de diagnóstico rápido, seguro y de fácil realización. Consiste en la obtención de una imagen radiológica producida cuando se interpone la zona del cuerpo que se quiere estudiar, entre una fuente emisora de rayos X y una placa radiográfica o un registro fotográfico digital. Dicha placa radiográfica es una lámina de poliéster impregnada en cristales de nitrato o haluros de plata (bromuro, cloruro e yoduro de plata), dispersos en un medio gelatinoso. Estos compuestos se ennegrecen al oxidarse, o sea al ser expuestos a la radiación.

Los parámetros básicos que miden la producción de rayos X, aplicados a radiología, son los siguientes:

- Kilovoltaje (kV): mide la energía con la que impactan los electrones acelerados o rayos catódicos contra el ánodo (producción posterior de rayos X) y nos va a dar la profundidad de penetración de los rayos. A mayor kV, mayor penetración en los tejidos.
- Miliamperaje (mA): implica la densidad o cantidad de rayos producidos, cuanto mayor mA, mayor va a ser el contraste.
- Tiempo (s): va a marcar la duración de la exposición en cada disparo.

En cuanto a los equipos radiológicos, existen diferentes tipos: los fijos, los rodantes y los portátiles, que pueden ser utilizados para las diferentes especies animales dependiendo de la

comodidad necesaria para aplicar la técnica, por ejemplo los equipos portátiles son más usados en los grandes animales, tal el caso de los equinos donde es más fácil su transporte y uso (Fig.10.8). También, en función del revelado, los equipos podrán ser con revelado digitales o manuales.

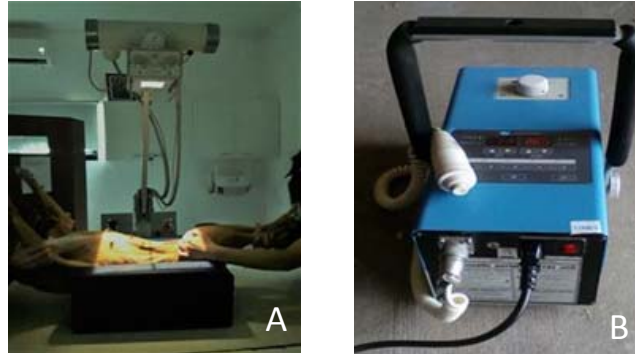
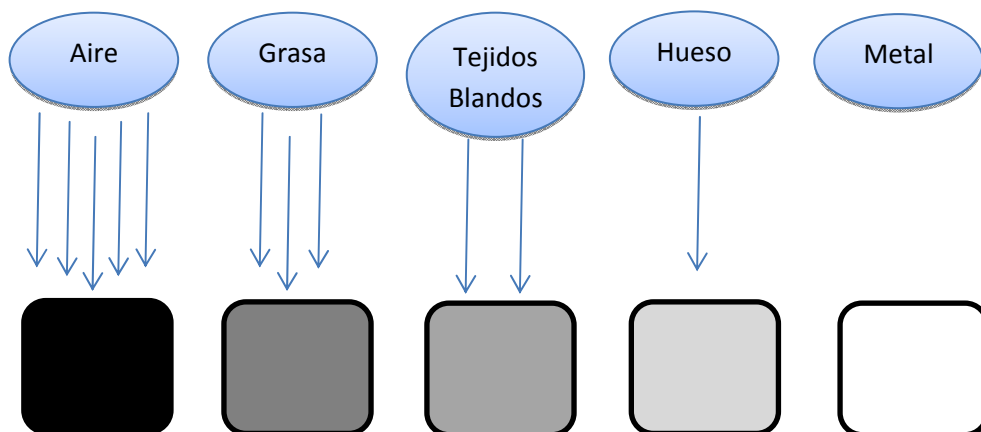


Figura 10.8: Diferentes equipos radiológicos: A: fijo; B: portátil.

Para la formación de la imagen son necesarios: las películas radiográficas (donde se va a ver impresa la imagen); el chasis o pantallas intensificadoras (donde se coloca la película); el revelado (los cristales de plata expuestos a los rayos X precipitan sobre la película, ennegreciéndola) y el fijado de la misma (los cristales no expuestos a los rayos son removidos durante el proceso de fijación). El radiólogo ubica al paciente sobre una camilla, que presenta por debajo un chasis, que contiene la película plástica entre dos pantallas fluorescentes. Luego, manda un haz de rayos X al chasis atravesando la zona que se desea estudiar. La radiación hace brillar las pantallas fluorescentes, quedando la placa impresionada por la luz de las pantallas en un 90% y por los rayos en el 10% restante. Entonces, la imagen permanecerá en forma latente hasta que es revelada en un cuarto oscuro, agregando soluciones reveladoras y fijadoras.

La imagen formada va a depender de la densidad y espesor de los tejidos que atraviesan los rayos X, distinguiéndose diferentes escalas de grises en función de que el tipo de elemento permita que lo atraviese más o menos cantidad de rayos. Así, por ejemplo, los huesos absorben gran parte de la radiación mientras que los tejidos blandos, como los músculos, la grasa y los órganos, permiten que los rayos X pasen a través de ellos. En consecuencia, los huesos aparecen blancos en la imagen radiológica, mientras que los tejidos blandos se muestran en matices de gris. El aire, en tanto aparece de color negro (Fig. 10.9).



*Figura 10.9: Esquema de la escala de grises que se forma al atravesar, los rayos X, los diferentes elementos.*

Esta característica nos permite así, reconocer las diferentes estructuras y en base a un estudio detallado de la imagen, realizar los aportes necesarios para complementar el diagnóstico. Por ejemplo, podemos observar líneas de fractura, cuerpos metálicos o cuerpos extraños, cambios en la morfología o en la ubicación de las diferentes estructuras y así poder identificar en que región se encuentran para aplicar el correcto tratamiento (Fig. 10.10).



*Figura 10.10: Las imágenes radiográficas nos permiten reconocer diferentes estructuras y detectar algunas patologías o lesiones, tales como presencia de objetos metálicos, fracturas, neumotórax, etc.*

En los últimos años, se ha empezado a utilizar la denominada Radiología Digital. Esta consiste en que, en el chasis, en vez de haber una película radiográfica fotosensible (con



acetato de emulsión de plata) hay un sistema formado por una pantalla de fósforo, que luego es escaneada y “limpiada” para su siguiente uso. Luego esa imagen es transmitida a una computadora, sin costos de materiales plásticos ni químicos y con la posibilidad de generar archivos jpg o gif, que pueden ser vistos varias veces. También existe una forma directa en la cual no se utiliza chasis, sino que, en la misma camilla radiológica, hay una pantalla de fósforo con detectores que envían la información directamente a la computadora, obteniéndose luego, la imagen digital.

Estos cambios generaron muchas ventajas como por ejemplo evitar varios errores por poca resolución, o fallas en el contraste, así, también como disminuir la exposición del paciente a las repetidas placas.

## Otros Usos de los rayos X

### Radioscopía

A diferencia de la radiografía, es un método dinámico, en el cual la imagen se observa a través de una pantalla. Con la misma podemos evaluar, por ejemplo, con el uso de líquidos radiopacos, las cámaras cardíacas, estudios hemodinámicos, uréteres permeables o ectópicos, etc. El gran problema de este método es que el paciente tiene un alto tiempo de exposición a los rayos.

La palabra Radioscopía viene de la conjunción de radio y skopeo (en griego, mirar). Su objetivo es el examen interno del cuerpo y, en general, de los órganos opacos, mediante una imagen que proyectan en una pantalla, al ser atravesados por los rayos X. Muestra el movimiento de las estructuras internas del organismo.

En resumen, es una técnica de imagen: **radiológica** (se realiza con rayos X); **proyectiva** (se superponen todos los tejidos en la imagen); **morfológica** (observamos las estructuras anatómicas con gran resolución); **dinámica** (es una imagen en movimiento); **en tiempo real** (lo que se ve está sucediendo en ese preciso momento).

La placa (receptor de imagen) posee sustancias fluorescentes que emiten luz visible al absorber la radiación de rayos X, ofreciéndonos imágenes en tiempo real. En las pantallas radioscópicas las imágenes más brillantes o claras (más blancas) corresponden a las estructuras menos radiodensas y de bajo número atómico (por ej. aire); mientras que las imágenes más oscuras (más negras), corresponden a las más radiodensas y de mayor número atómico (por ej. hueso).

## **Tomografía Axial Computarizada (TAC)**

La tomografía axial computarizada (TAC) es una prueba de diagnóstico mediante la utilización de rayos X y procesamiento de las imágenes por computadora. Con este método podemos obtener varios cortes transversales de un segmento, ya que posee un aparato llamado "Gantry", que emite un haz de rayos X, y a su vez va girando, cambiando su angulación con respecto al cuerpo del paciente. Funciona gracias a la entrada simultánea de muchos haces de rayos desde distintos ángulos. Así, se obtienen varias secciones del individuo. La ventaja más relevante de la TAC es que permite diferenciar tejidos con un coeficiente de absorción menor al 0,5%, en cambio la radiografía sólo diferencia tejidos con coeficientes mayores a un 10%.

Es un método de estudio y exploración anatómica no invasivo, útil para el diagnóstico de diversas patologías que afectan a los distintos tipos de tejidos. Vale decir que la indicación de una TAC, nunca es pedida en primera instancia, sino que viene precedida, por la utilización de métodos de menor complejidad como la radiología convencional y/o la ecografía. Este método se diferencia de la radiología en que la atenuación que sufren los rayos luego de atravesar el cuerpo en estudio en vez de ser captados por una placa radiográfica son codificados por un grupo de senso-receptores electrónicos que transforman la información obtenida en una matriz digital, proyectando la imagen anatómica sobre la pantalla de un monitor, en una muy detallada escala de grises.

La imagen obtenida está representada en primera instancia, en una imagen de 2 dimensiones en blanco y negro de diferentes cortes transversales del cuerpo y nos permite ver con gran nitidez los distintos planos tisulares del organismo. Durante el estudio, el paciente permanece acostado en una camilla, y ésta se desliza dentro del tubo que genera los rayos X, que gira alrededor del paciente. Hay que permanecer quieto mientras dura el examen para que las imágenes sean de buena calidad. La cantidad de radiación que se usa en cada prueba es poca, pero podría ser perjudicial para un feto.

## **Tomografía por emisión de positrones (PET)**

En esta técnica, la obtención de la imagen se da a partir de la inyección de un radiofármaco. En este caso, el elemento radioactivo será un emisor de positrones; estas partículas, al encontrarse con un electrón del cuerpo del paciente se aniquilan y emiten dos fotones gamma que son detectados por el tomógrafo; para ello, es necesario un ciclotrón (generador de radioisótopos) y de un laboratorio de radioquímica.

Se caracteriza por tener mayor sensibilidad y mayor resolución de imagen. A diferencia de la TAC, estos estudios muestran la distribución de una molécula orgánica unida al material

radioactivo de acuerdo con su metabolismo corporal. El radiofármaco más utilizado es el Flúor 18 (F18) unido a una molécula de 18-FDG (fludesoxiglucosa), que se utiliza principalmente, para la detección de células tumorales, ya que éstas captan más glucosa que las células normales, emitiendo así la radiación, que advierte dónde están las células malignas.

La tomografía por emisión de positrones, también llamada diagnóstico por imágenes PET, constituye un tipo de diagnóstico por imágenes de medicina nuclear. Se trata de una subespecialidad del campo de las imágenes médicas que utiliza cantidades muy pequeñas de material radioactivo para diagnosticar o tratar una variedad de enfermedades, incluyendo muchos tipos de cáncer, enfermedad cardíaca y otras patologías.

Con esta técnica, el paciente recibe la inyección de un trazador radiactivo, combinado con glucosa, y posteriormente se introduce en la cámara, donde emite energía en forma de rayos gamma. Una característica fundamental del radiofármaco emisor de positrones es su corta vida media; por ello la cantidad de radiación emitida y recibida por el paciente es extraordinariamente baja, similar a la recibida durante la realización de una TAC común. Por otra parte, y en cuanto a la glucosa empleada, es tan escasa la cantidad inyectada, que tampoco hay peligro de reacciones de ningún tipo.

### **Centellografía**

Es otro método de diagnóstico, en el que se realiza la administración de radiofármacos, pero en esta técnica la imagen se obtiene por contadores de centelleo que se desplazan con un movimiento de barrido. Los rayos gamma emitidos por el radioisótopo son recogidos, luego, por un fotomultiplicador.

Se utilizan principalmente para el examen de la función tiroidea. Para ello, se le administra al paciente una cierta dosis de Yodo 131 ( $^{131}$ ), el cual es detectado en la tiroides luego de transcurrir un determinado tiempo (30 minutos aproximadamente). Hay que recordar que la tiroides regula el metabolismo del Yodo, el cual es requerido para la síntesis de las hormonas tiroideas, por lo cual se va a detectar si la captación de Yodo está disminuida (hipotiroidismo) o aumentada (hipertiroidismo).

### **Gammagrafía**

Tiene un fundamento similar a la centellografía, a diferencia de que posee muchos fotomultiplicadores, obteniéndose imágenes planas bidimensionales. Una gammagrafía implica inyectar una cantidad muy pequeña de material radiactivo (marcador) dentro de una vena (Tecnecio 99 es el más utilizado). La sustancia viaja a través de la sangre hasta los huesos y

órganos. A medida que va desapareciendo, emite radiación, la que es detectada por una cámara que lentamente rastrea el cuerpo. La cámara toma imágenes de la cantidad de marcador radiactivo acumulado. Esta técnica se utiliza, principalmente, para examinar el tejido óseo o blando ligamentoso en las claudicaciones de los equinos, donde se ve en el área de la lesión, la mayor fijación del radiofármaco.

## **Radioterapia**

Se denomina, así al uso de las radiaciones ionizantes para el tratamiento de enfermedades neoplásicas, que se lleva a cabo mediante dos técnicas: utilizando haces de radiación ionizante que se dirigen desde el exterior del cuerpo del paciente hacia la región del cuerpo en donde esté localizado el tumor maligno (teleterapia), o mediante el uso de la braquiterapia, la cual consiste en la implantación del emisor de radiaciones de forma encapsulada en una región cercana al tumor de forma intracavitaria o intersticial.

Tiene como objetivo principal depositar una dosis de radiación tal que logre destruir las células tumorales y minimizar el daño en el tejido circundante.

Para su aplicación, se utilizan equipos de cobaltoterapia, aceleradores lineales de electrones y de rayos X.

## **Rayos Infrarrojos y Ultravioletas**

Dentro de las radiaciones de baja frecuencia podemos encontrar, entre otras, a la luz visible, las radiaciones infrarrojas y las ultravioletas.

Las **radiaciones ultravioletas** ocupan una amplia banda de longitudes de onda en el espectro electromagnético, con un rango entre 1 a 380-400 nm, ubicándose entre los rayos X y la luz visible, la cual, a su vez se extiende desde los 400 a los 700 nm. Según este parámetro, se distinguen varios subtipos de rayos ultravioletas (Tabla 10.2).

**Tabla 10.2: Subtipos de rayos ultravioletas**

Nombre	Abreviación	Longitud de onda (nm)	Energía por fotón (eV)
Ultravioleta cercano	NUV	400-200	3,10-6,30
Onda larga	UVA	400-320	3,10-3,87
Onda media	UVB	320-280	3,87-4,43
Onda corta	UVC	283-200	4,43-6,20
Ultravioleta lejano	FUV, VUV	200-100	6,20-124
Ultravioleta extremo	EUV, XUV	100-1	13,6-1240

Este tipo de radiación proviene de fuentes naturales (radiación solar), siendo absorbida en gran parte por la atmósfera, llegando a nosotros sólo longitudes de onda mayores a 295 nm. También puede ser creada artificialmente, por ejemplo, a través de lámparas de vapor de mercurio. Es un tipo de radiación, en general, no ionizante. Entre sus efectos podemos destacar la acción fotoquímica que posee, actuando en el proceso de activación de la vitamina D en la piel. Se sabe que parte de la radiación ultravioleta que llega a la piel es reflejada, mientras que otra parte es absorbida, sin llegar a superar los 2 mm de profundidad, pudiendo generar en ella, desde un ligero eritema hasta la formación de ampollas y, en el caso de exposición prolongada, el aumento de la pigmentación dérmica.

Otra característica que posee es su importante acción bactericida, sobre todo en longitudes de onda cercanas a los 265 nm, al afectar el material genético de los microorganismos, induciendo cambios en la multiplicación y viabilidad celular. Es por ello que se la utiliza para la conservación de frutas, vegetales y carnes y para la esterilización de agua, materiales odontológicos y quirúrgicos, así también como en las mesadas de laboratorio.

Las **radiaciones infrarrojas**, por su parte, son radiaciones electromagnéticas y térmicas, cuya longitud de onda es superior y va desde 700 hasta 10000 nm. Este tipo de radiaciones se clasifica, a su vez, según la longitud de onda que posean en infrarrojo cercano, medio y lejano (Tabla 10.3).

**Tabla 10.3: Clasificación de radiaciones infrarrojas según su longitud de onda**

<b>Nombre</b>	<b>Longitud de onda</b>
Infrarrojo cercano	800-1500 nm
Infrarrojo medio	1500-5000 nm
Infrarrojo lejano	5000-10000 nm

El cuerpo animal es un emisor natural de radiaciones infrarrojas, siendo uno de los mecanismos por medio de los cuales es capaz de liberar calor. Además, la capacidad de generar calor seco de este tipo de radiaciones permite que sean utilizadas en la clínica para tratar ciertas afecciones. Se utiliza la que comprende un rango que va de los 800 a los 1500 nm de longitud de onda y está indicado su uso para mialgias y esfuerzos articulares y tendinosos, a través de la llamada termoterapia.

## **Diferentes unidades de medida. Unidades de dosis**

En algunos casos la radiación que incide sobre la materia, puede atravesar el material sin sufrir ninguna interacción. Esta radiación puede ser medida y sus efectos cuantificados, a partir de contadores o dispositivos especiales que permiten detectarla (contador Geiger; radiómetros para diferentes radiaciones).

### **Dosis absorbida**

La dosis absorbida (D) es la energía por unidad de masa, que un material ha absorbido. Es una magnitud que es cuantificada en un punto determinado del cuerpo. Anteriormente se medía en rad (Radiation Absorbed Dose), pero actualmente se mide en Gray (Gy).

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$$

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/Kg}$$

Hay que tener en cuenta que cuando nos referimos a la dosis absorbida en un órgano o un tumor utilizaremos un valor promedio para el tejido a considerar.

## Dosis equivalente

La dosis equivalente (H), tiene en cuenta el tipo de radiación ionizante que actúa sobre un tejido, ya que según de qué tipo sea, a igual dosis absorbida el daño será distinto. Se calcula multiplicando la dosis absorbida (D) por un factor de calidad (Q), que es adimensional y que depende del tipo y energía de la radiación (Tabla 10.4). A mayor daño causado por la radiación, mayor será el valor de Q.

Antiguamente la unidad de medida de H era el rem (Radiation Equivalent in Men). Actualmente se utiliza el Sievert (Sv).

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/Kg}$$

Si la dosis absorbida viene expresada en Gray, la dosis equivalente se expresa en Sievert.

**Tabla 10. 4: Factor de calidad (Q) para diferentes tipos de radiaciones**

Factor de calidad (Q)	Tipo de radiación
1	Fotones y electrones
5	Neutrones y protones
20	Partículas $\alpha$

## Dosis efectiva

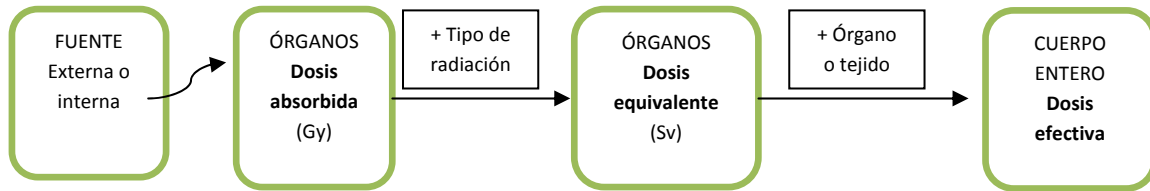
Según el tipo de radiación que actúa y el órgano o tejido que la ha absorbido, los efectos biológicos serán distintos. Es importante conocer entonces la dosis efectiva (E), magnitud derivada de la dosis equivalente y que considera también la sensibilidad a la radiación que poseen los diferentes tejidos, ya que algunos son más radiosensibles que otros.

Se calcula realizando la sumatoria de las dosis equivalentes ponderadas en todos los órganos y tejidos del cuerpo (o sea multiplicadas por un factor de ponderación del tejido), mediante la siguiente expresión:

$$E = \sum_t W_t \cdot H_t$$

Siendo:  $W_T$  = factor de ponderación para el tejido T.  $H_T$  = dosis equivalente en el tejido u órgano T.

Esta magnitud se mide en Sievert (Sv) que, como fue dicho anteriormente, equivale a Julio/ Kg.



## Radioprotección

Hay que tener en cuenta que las radiaciones ionizantes pueden producir efectos biológicos sobre los tejidos vivos, que se dividen en dos clases:

- **Determinísticos:** Se producen cuando la dosis recibida es mayor a la dosis mínima. Se presentan rápidamente, son dentro de todo leves, pero aumentan su severidad en cuanto aumenta la dosis recibida. Por ejemplo: Cataratas, enrojecimiento de piel, y esterilidad.
- **Estocásticos:** son lo que pueden aparecer al azar dependiendo de las dosis, sin tener en cuenta una dosis mínima. Se dan generalmente por la acumulación de dosis y tiempo de exposición. Por ejemplo: Cáncer.

Por estas razones, una persona que deba estar expuesto diariamente a las radiaciones, por ejemplo, un radiólogo debe medir la dosis absorbida periódicamente, así también como la carga de radiación ambiental.

A su vez, debemos considerar que los tejidos corporales presentan diferente sensibilidad a las radiaciones, según la escala de radiosensibilidad de Engelmann, donde el orden de mayor a menor sensibilidad de los tejidos es el siguiente:



**Tabla 10.5: Tejidos de mayor a menor sensibilidad a los rayos X, según Engelmann**

1. Tejido Hematopoyético	9. Riñón
2. Timo	10. Adrenales
3. Ovario	11. Glándulas Intestinales
4. Testículo	12. Hígado
5. Mucosas y Glándulas	13. Páncreas
6. Glándulas sudoríparas y sebáceas	14. Tiroides
7. Epidermis	15. Músculo Estriado
8. Serosas	16. Tejido Conjuntivo

La protección radiológica tiene como principio garantizar que el personal expuesto, el público y los pacientes, no sufran efectos biológicos deterministas debido a la radiación ionizante, y la probabilidad de aparición de efectos probabilísticos, quede limitada a un valor que sea socialmente aceptado.

Existen organizaciones encargadas de regular las normativas y principios de radioprotección tales como: la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP); la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA); el Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR); la Sociedad Argentina de Radioprotección y la Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN).

*Los principios básicos de la radioprotección son:*

- **Justificación:** Una actividad en la cual esté implicada la emisión periódica de radiaciones ionizantes, solo se llevará a cabo si da lugar a algún beneficio.
- **Optimización:** Luego que la actividad esté justificada, se podrán usar radiaciones ionizantes siempre y cuando las dosis se mantengan lo más bajas posible.
- **Limitación:** En ningún caso la actividad dará lugar a valores individuales de dosis por encima de los límites establecidos.

*Los límites de dosis para la exposición ocupacional son:*

- Límite de dosis efectiva: 20 milisievert por año. Este valor debe ser considerado como el promedio en 5 años consecutivos (100 milisievert en 5 años), no pudiendo excederse a 50 milisievert en un único año.
- Límite de dosis equivalente: 150 milisievert por año para el cristalino del ojo y 500 milisievert por año para la piel.

Para verificar el cumplimiento de los límites de dosis citados se suma la dosis equivalente efectiva anual producida por la exposición externa y la dosis equivalente efectiva comprometida debida a la incorporación de material radiactivo en el cuerpo, durante el año.

## Referencias

- Autoridad Regulatoria Nuclear (19 de septiembre de 2017). Recuperado de <http://www.arn.gov.ar/>
- CaDiMe (2000). Manual de Radioprotección. Buenos Aires: Cámara de Instituciones de Diagnóstico Médico.
- Cisale H. (2014). Radiaciones e interacciones electromagnéticas. En H. Cisale. *Física Biológica Veterinaria (2° edición)* (pp. 163-183). Buenos Aires: Eudeba.
- Cisale H. (2014). Radiactividad. En H. Cisale. *Física Biológica Veterinaria (2° edición)* (pp. 185-199). Buenos Aires: Eudeba.
- Comisión Nacional de Energía Atómica (19 de septiembre de 2017). Recuperado de <http://www.cnea.gov.ar/>
- Frumento A. S. (1995). Biofísica (3° Edición). (pp 449-562). Madrid: Mosby/Doyma Libros S.A.
- Sánchez Galiano P. (2005) Introducción a la Física de la radioterapia (pp. 1-72). Viena, Austria: Hospital Central de Asturias, Unidad de Radiofísica.
- González Sprinberg G., Rabin Lema C. (2011). Para entender las radiaciones. Uruguay: DIRAC, Facultad de Ciencias, Universidad de la República.
- International Atomic Energy Agency (19 de septiembre de 2017). Recuperado de: <https://www.iaea.org/>
- Parisi M. (2001). Capítulo 7: Nucleónica biológica. Medicina nuclear. Diagnóstico por imágenes. En: M. Parisi *Temas de Biofísica* (pp 133-171). Santiago de Chile: McGraw-Hill. Interamericana de Chile LTDA.
- Sociedad Argentina de Radioprotección (19 de septiembre de 2017) Recuperado de: <http://radioproteccionsar.org>

# Los autores

## Coordinadoras

### **Coll Cárdenas, Fernanda**

Médica Veterinaria, Bacterióloga Clínica e Industrial, Dra en Ciencias Veterinarias, Docente Universitaria Especializada, títulos otorgados por la Facultad de Ciencias Veterinarias, UNLP.

Profesora Titular Ordinaria de la Cátedra de Introducción a la Biofísica, Facultad de Ciencias Veterinarias, UNLP. Docente del Curso de Biofísica. Jefe de Trabajos Prácticos Ordinaria de la Cátedra de Enfermedades Infecciosas, Facultad de Cs Veterinarias, UNLP. Docente del Curso de Infectología, Zoonosis, Enfermedades exóticas y emergentes. Docente Investigadora Categoría III. Directora de Proyectos de Investigación relacionados con el análisis fisicoquímico y microbiológico de los productos cárnicos y la aplicación de modelos matemáticos y en docencia universitaria.

### **Olivera, Daniela**

Ingeniera Química, Dra en Ingeniería Química, títulos otorgados por la Facultad de Ingeniería, UNLP. Profesora Adjunta Ordinaria de la Cátedra de Introducción a la Biofísica, Facultad de Ciencias Veterinarias, UNLP. Docente del Curso de Biofísica. Investigadora Adjunta (CONICET) del Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos, CIDCA, CONICET. Directora y participante de Proyectos de Investigación relacionados con el análisis fisicoquímico y microbiológico de los productos cárnicos y tratamientos de conservación de diversos alimentos.

## **Autores**

### **Amasino, Ana Julia**

Médica Veterinaria, título otorgado por la Facultad de Ciencias Veterinarias, UNLP. Auxiliar Diplomado de la Cátedra de Introducción a la Biofísica, Facultad de Ciencias Veterinarias, UNLP. Docente del Curso de Biofísica. Auxiliar Diplomado de la Cátedra de Enfermedades Infecciosas, Facultad de Cs Veterinarias, UNLP. Docente del Curso de Infectología, Zoonosis, Enfermedades exóticas y emergentes. Participante de Proyectos de Investigación relacionados con el análisis fisicoquímico y microbiológico de los productos cárnicos y en docencia universitaria.

### **Becerra, Romina**

Licenciada en Biología, Orientación Zoología, título otorgado por la Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP. Auxiliar Diplomado de la Cátedra de Introducción a la Biofísica, Facultad de Ciencias Veterinarias, UNLP. Docente del Curso de Biofísica. Auxiliar Diplomado de la Cátedra de Fisiología y Física Biológica, Facultad Cs. Médicas. UNLP. Doctorado en Ciencias de la Salud, en curso. Participante de Proyectos de Investigación relacionados con el estudio de diversos mecanismos subcelulares que subyacen en el desarrollo de diferentes patologías miocárdicas.

### **Bruzzo Lafratto, Joaquín**

Alumno de 5to año de la Facultad de Ciencias Veterinarias, UNLP. Ayudante Alumno Ordinario de la Cátedra de Introducción a la Biofísica, Facultad de Ciencias Veterinarias, UNLP. Docente del Curso de Biofísica.

### **De la Sota, Pablo Elias**

Médico Veterinario, Especialista en Docencia Universitaria, títulos otorgados por la Facultad de Cs Veterinarias, UNLP. Jefe de Trabajos Prácticos Ordinario de la Cátedra de Introducción a la Biofísica, Facultad de Ciencias Veterinarias, UNLP. Docente del Curso de Biofísica y del Curso de Fisicoquímica Aplicada a la Fisiología Veterinaria. Magister en Tecnología Informática Aplicada en Educación, en curso. Docente Investigador Categoría IV. Participante en Proyectos de Investigación relacionados con el análisis fisicoquímico y microbiológico de los productos cárnicos y la aplicación de modelos matemáticos.

### **Fernández Blanco, Mariana**

Médica Veterinaria, título otorgado por la Facultad de Ciencias Veterinarias, UNLP. Becaria de iniciación, UNLP. Auxiliar Diplomado de la Cátedra de Introducción a la Biofísica, Facultad de Ciencias Veterinarias, UNLP. Docente del Curso de Biofísica. Tesis de Doctorado en curso. Participante de Proyectos de Investigación relacionados con el análisis fisicoquímico y microbiológico de los productos cárnicos y la aplicación de modelos matemáticos y en docencia universitaria.

### **Laporte, Gladys Mabel**

Ingeniera Agrónoma, título otorgado por la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP. Especialista en Docencia Universitaria, título otorgado por la Facultad de Cs Veterinarias, UNLP. Jefe de Trabajos Prácticos de la Cátedra de Introducción a la Biofísica, Facultad de Ciencias Veterinarias, UNLP. Docente del Curso de Biofísica. Auxiliar Diplomado Ordinario de la Cátedra de Terapéutica Vegetal, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP. Docente Investigadora Categoría IV. Participante de Proyectos de Investigación relacionados con el análisis fisicoquímico y microbiológico de los productos cárnicos y la aplicación de modelos matemáticos.

### **Miranda, Roque Pablo**

Médico Veterinario, título otorgado por la Facultad de Ciencias Veterinarias, UNLP. Jefe de Trabajos Prácticos del Hospital Escuela, área de grandes animales. Docente de los Cursos de Clínica y Enfermedades de los equinos. Docente colaborador en el Curso de Biofísica. Participante de Proyectos de Investigación relacionados con el análisis fisicoquímico y microbiológico de los productos cárnicos y la aplicación de modelos matemáticos.

### **Olaiz, Daniel Adrián**

Médico Veterinario, título otorgado por la Facultad de Ciencias Veterinarias, UNLP. Profesor Adjunto de la Cátedra de Introducción a la Biofísica, Facultad de Ciencias Veterinarias, UNLP. Docente del Curso de Biofísica y del Curso de Fisicoquímica Aplicada a la Fisiología Veterinaria. Director de Proyectos de Extensión relacionados con la tenencia responsable de mascotas.

### **Pellegrino, Francisco Javier**

Médico Veterinario, Doctor en Ciencias Veterinarias, títulos otorgados por la Facultad de Ciencias Veterinarias, UNLP. Jefe de Trabajos Prácticos de la Cátedra de Introducción a la Biofísica, Facultad de Ciencias Veterinarias, UNLP. Docente del Curso de Biofísica. Becario

posdoctoral CONICET. Docente Investigador del Laboratorio de Fisioterapia Veterinaria. Participante de Proyectos de Investigación en Nutrición y Fisiología del ejercicio en caninos.

### **Pelosi, Julieta**

Alumna de 5to año de la Facultad de Ciencias Veterinarias, UNLP. Ayudante Alumna Ordinario de la Cátedra de Introducción a la Biofísica, Facultad de Ciencias Veterinarias, UNLP. Docente del Curso de Biofísica.

### **Sirini, Matías Ángel**

Médico Veterinario, título otorgado por la Facultad de Ciencias Veterinarias, UNLP. Auxiliar Diplomado de la Cátedra de Introducción a la Biofísica, Facultad de Ciencias Veterinarias, UNLP. Docente del Curso de Biofísica. Tesis de Doctorado, en curso. Participante de Proyectos de Investigación relacionados con la biotecnología de la reproducción en rumiantes.

Biofísica para estudiantes de Ciencias Veterinarias / Fernanda Coll Cárdenas ... [et al.] ;  
coordinación general de Fernanda Coll Cárdenas ; Daniela Olivera. - 1a edición para el alumno - La  
Plata : Universidad Nacional de La Plata ; La Plata : EDULP, 2018.

Libro digital, PDF - (Libros de cátedra)

Archivo Digital: descarga y online  
ISBN 978-950-34-1707-2

1. Biofísica. 2. Veterinaria. I. Coll Cárdenas, Fernanda II. Coll Cárdenas, Fernanda, coord. III.  
Olivera, Daniela, coord.  
CDD 636.089

Diseño de tapa: Dirección de Comunicación Visual de la UNLP

Universidad Nacional de La Plata – Editorial de la Universidad de La Plata  
47 N.º 380 / La Plata B1900AJP / Buenos Aires, Argentina  
+54 221 427 3992 / 427 4898  
edulp.editorial@gmail.com  
www.editorial.unlp.edu.ar

Edulp integra la Red de Editoriales Universitarias Nacionales (REUN)

Primera edición, 2015  
ISBN 978-950-34-1707-2  
© 2018 - Edulp

**n**  
naturales



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE LA PLATA