



anaya

MANUALES DE
ORIENTACION
UNIVERSITARIA

BIOLOGIA

II



d. f. galiano

BIOLOGIA

II

d. f:galiano

CATEDRATICO EN MICROBIOLOGIA DE LA FACULTAD
DE CIENCIAS (UNIVERSIDAD DE MADRID)

ACADEMICO NUMERARIO DE LA REAL ACADEMIA
NACIONAL DE MEDICINA

anaya

INDICE



Páginas

TERCERA PARTE: Nivel individual (continuación)

Nociones de genética	7
Genética mendeliana	21
Los cromosomas en la herencia	41
Las mutaciones	53
La integración de las funciones en el organismo vegetal.	67



La integración de las funciones en el organismo animal: el movimiento	85
La nutrición en los animales	99
Los alimentos	117
El transporte en los animales pluricelulares	131
La excreción y los tegumentos	145
La coordinación orgánica	161
Las hormonas	177

CUARTA PARTE: Nivel de Comunidades

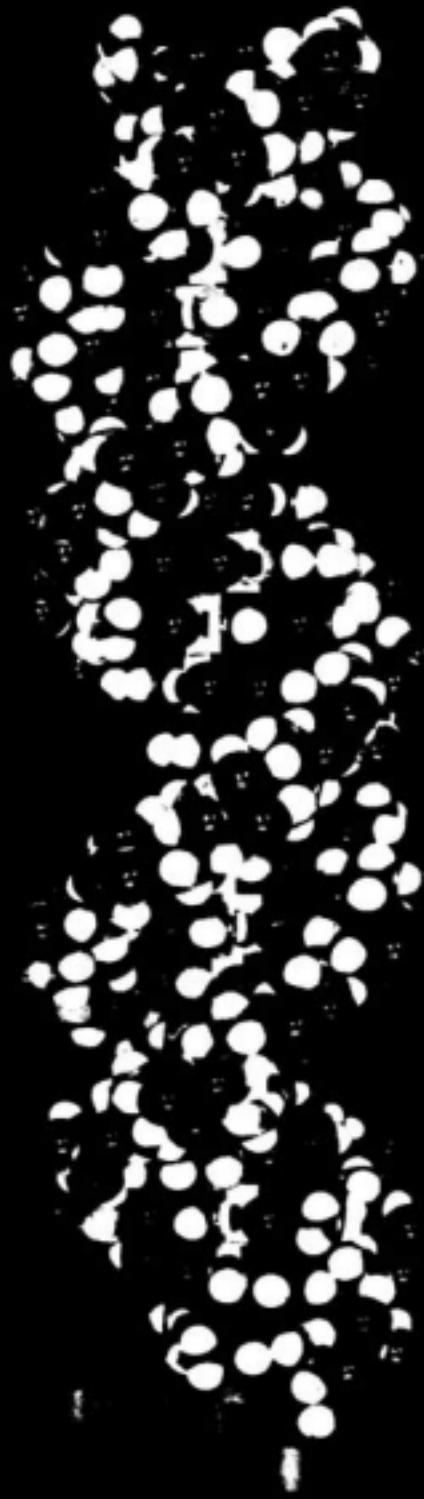
Los organismos y el ambiente	199
Ecología de las comunidades	213

QUINTA PARTE: El mundo de los microorganismos

Los microorganismos	229
Los microorganismos y los animales superiores	247

SEXTA PARTE: La evolución

La evolución	267
Genética de poblaciones y evolución	283



TERCERA PARTE (Continuación)

NOCIONES DE GENETICA

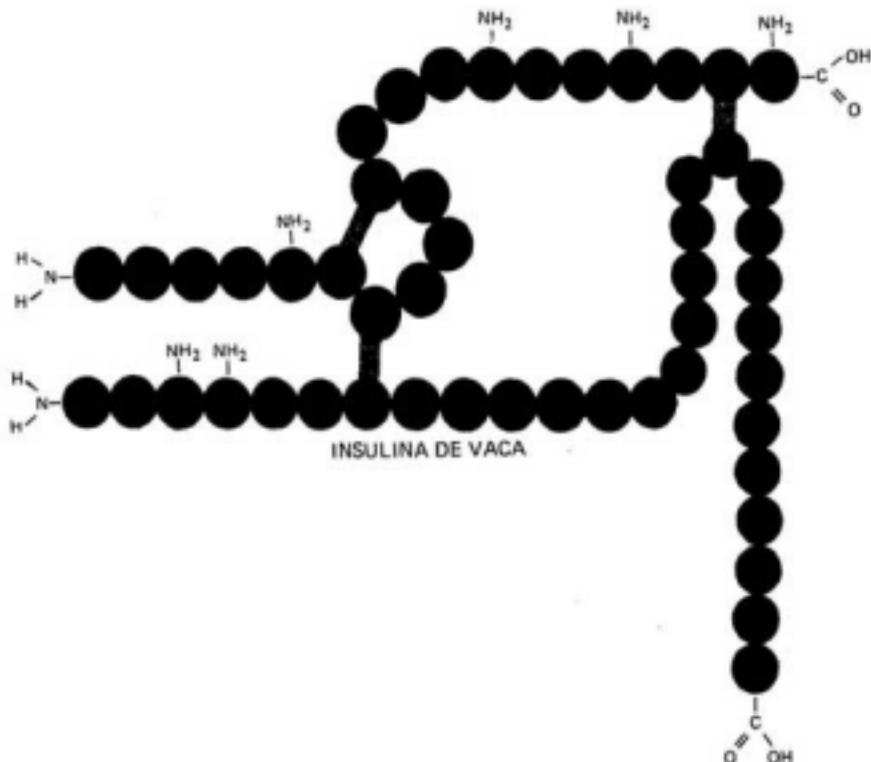
Anteriormente hemos visto que los organismos pluricelulares, igual que las células mismas, se reproducen, es decir, producen otros seres vivientes parecidos a ellos, que se llaman en general los hijos.

El hecho que los hijos se parezcan precisamente a los padres y no a otros seres vivos, que el tripanosoma se divide en dos tripanosomas, que el huevo puesto por una mosca de lugar a una mosca y que de las semillas del trigo salgan plantas de trigo, hace suponer que el desarrollo de los organismos, tanto unicelulares como pluricelulares, está programado de tal manera que obedece a unas instrucciones contenidas en el material viviente de los padres y que se transmite a los hijos en forma de mensaje. Hace algunos años no se podía comprender cómo y dónde se cifraba ese mensaje. Hoy se sabe que el organismo sintetiza lo más importantes de sus componentes de acuerdo con las características peculiares de sus ácidos nucleicos, cuyo conjunto forma el mensaje a que estamos haciendo referencia. El mensaje es discontinuo y está formado por unos elementos que denominamos genes. De ahí que se llame el mensaje genético y que se designe con el nombre de Genética la Ciencia que estudia la naturaleza, el funcionamiento y la transmisión de los genes.

◀ *El ácido desoxirribonucleico es el soporte material de la herencia. He aquí una fotografía de un modelo de una molécula de ADN.*

LA SINTESIS DE PROTEINAS

Las **proteínas** son las sustancias más importantes de la célula, ya que determinan la individualidad de ésta. Una célula es distinta de otra, no solamente porque sus proteínas estructurales son diferentes, sino porque, siendo diferentes la **naturaleza** y la **disposición relativa** de las proteínas enzimáticas, serán también diferentes los **procesos metabólicos**, y, en consecuencia, serán también diferentes, en naturaleza, cantidad y localización, los demás componentes celulares no proteicos.



Molécula de insulina de vaca, formada por dos cadenas polipeptídicas.

Ahora bien, las proteínas difieren unas de otras, en suma, por la distinta **ordenación, sucesión o secuencia** de los veinte **aminoácidos** conocidos, a lo largo de las cadenas de polipeptídos que forman cada molécula proteica.

Dado que las moléculas de proteína pueden tener un número variable de cadenas polipeptídicas, que cada cadena polipeptídica puede tener una longitud variable y que, dentro de ella, la ordenación de los distintos aminoácidos puede ser diferente, nos hallamos ante la posibilidad prácticamente infinita de formación de moléculas de proteína distintas.

Pero también sabemos que las moléculas proteicas y polipeptídicas no están formadas al azar y que, por ejemplo, en el hombre la molécula de **insulina** está formada por dos cadenas polipeptídicas, de 21 y 30 aminoácidos respectivamente, y que estos aminoácidos están colocados a lo largo de la cadena en un orden idéntico en cada molécula de insulina.

Se entiende que, al sintetizarse cada una de las cadenas polipeptídicas de la insulina (como de cualquier otro polipéptido), los aminoácidos se han colocado en su **orden** correspondiente siguiendo ciertas **instrucciones**, en las que dicha ordenación estaba implícita.

Hoy se sabe que estas instrucciones están «cifradas» en el **ADN** del núcleo y que el contenido del mensaje depende del orden en el que estén colocadas en la cadena de ADN las **cuatro bases púricas y pirimidínicas**, adenina, guanina, citosina y timina.

A su vez, la información contenida en el **ADN** no pasa directamente a la proteína, sino al **ARN**, que, por último, traslada la información a la **proteína** que se está sintetizando, con lo cual, como hemos visto, la proteína tendrá **sus aminoácidos ordenados** de una u otra manera según el **ADN** del núcleo tuviera **ordenadas sus bases púricas o pirimidínicas**.

En el complicado proceso de la síntesis proteica, se pueden considerar, pues, dos procesos distintos, la **transcripción** y la **traducción**.

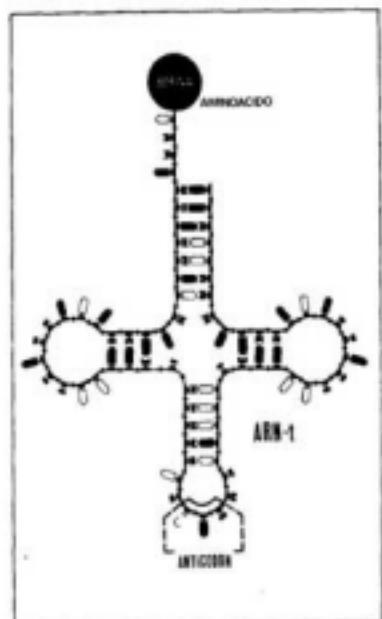
Transcripción.

Aparte de otros aspectos, la transcripción comprende fundamentalmente la síntesis de unas cadenas de **ARN mensajero (ARN-m)**, que se han formado bajo la influencia del ADN nuclear y cuyas bases púricas y pirimidínicas están ordenadas de acuerdo con la ordenación de las bases propias de dicho ADN. En otras palabras, este ARN-m lleva en su molécula cifrado el mensaje que ha de trasladar a la proteína.

Las moléculas de ARN-m son relativamente cortas, y cada una de ellas suele cifrar entre 2 y 10 cadenas de polipéptidos.

Traducción.

Este es el proceso mediante el cual la sucesión de las bases en el ARN-m determina la sucesión de los aminoácidos en el polipéptido.



*Ejemplo de una molécula de ARN-transferente
En la parte inferior, las tres bases que constituyen
el anticodón; en la parte superior, la molécula del
aminoácido transportado por el ARN-t. (En esta
ilustración y en las siguientes, las bases púricas y
pirimidínicas están representadas así:*

Adenina	█
Guanina	█ █
Citosina	█ █ █
Timina	█ █ █ █
Uracilo	█ █ █ █ █

La traducción es un proceso complejo que tiene lugar en los **ribosomas** y en el cual intervienen unas moléculas acidonucleicas intermedias, las moléculas de **ARN-transferente (ARN-t)**.

Son éstas unas cadenas polinucleotídicas cortas, que contienen de 70 a 80 nucleótidos. Aunque no todas las moléculas de ARN-t son iguales, ni siquiera parecidas, para la mayoría de ellas se admite que tienen una estructura en forma de hoja de trébol, en cuyo punto central radica un conjunto de tres bases, que constituyen el llamado **anticodón**. Por uno de sus extremos, cada molécula de ARN-t puede combinarse con un aminoácido determinado. Como se verá a continuación, las moléculas de ARN-t son las encargadas de recoger a los distintos aminoácidos y transportarlos hacia los ribosomas para integrarlos allí en la cadena polipeptídica en formación.

El mecanismo de la traducción es el siguiente: En primer lugar, la cadena de ARN-m, ya en el citoplasma, se adhiere a un ribosoma. El ribosoma no queda fijo sobre el ARN-m, sino que se desplaza a lo largo de la hebra de ARN-m (o el ARN-m se desplaza a través del ribosoma). El ribosoma, pues, moviéndose a lo largo del ARN-m va «leyendo» el mensaje desde un extremo al otro de la cadena. A veces, varios ribosomas, sucesivamente, se desplazarán a lo largo de una misma hebra de ARN-m, con lo que el mensaje podrá ser traducido repetidamente.

El mensaje contenido en el ARN-m está formado por una sucesión de bases púricas y pirimidínicas en un orden determinado.

Sin embargo, para el caso de la traducción, la unidad funcional es el **triplete o codón**, es decir, el conjunto de tres bases sucesivas. Podemos pues, considerar a estos efectos a la molécula de ARN-m como una **sucesión de tripletes**, por ejemplo citosina-adenina-guanina, citosina-uracilo-uracilo, guanina-guanina-guanina...

En el proceso de lectura del mensaje interviene ahora el ARN-t, en cuyas moléculas, como sabemos, existe un anticodón formado también por tres bases púricas y pirimidínicas. Entre las bases del codón y las del anticodón existe una afinidad bioquímica por la cual la **guanina** se combina con la **citosina** y la **adenina** con el **uracilo**. De este modo, cada codón tenderá a

combinarse con la molécula de ARN-t cuyo anticodón contenga las bases complementarias de las suyas. O dicho de otra manera, sobre los **distintos codones** se combinarán **distintas moléculas de ARN-t**, según el anticodón de éstas. Por ejemplo:

Sobre el mensaje anteriormente dicho, se combinarán las moléculas de ARN-t correspondientes a los codones siguientes:

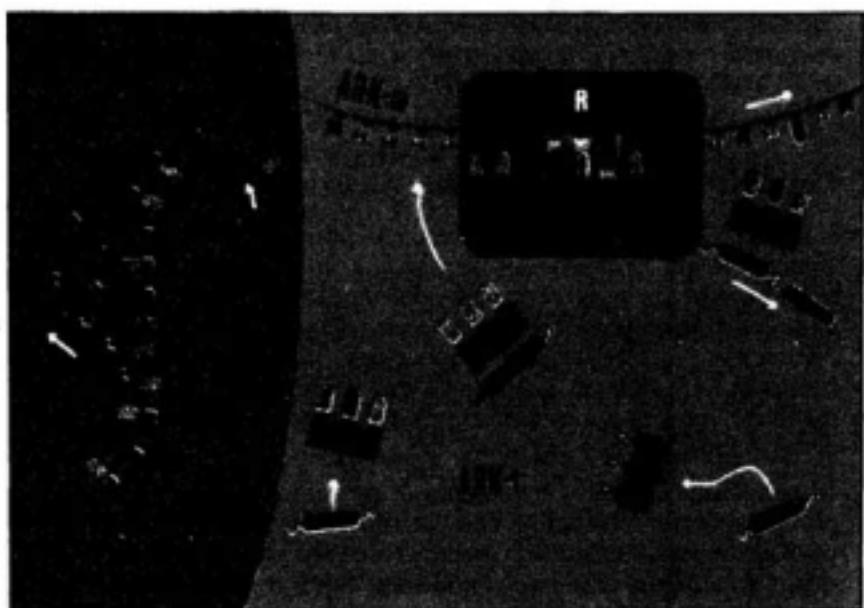
	<i>codones</i>
Mensaje en el ARN-m	c-a-g c-u-u g-g-g
Moléculas de ARN-t	g-u-c g-a-a c-c-c
<i>anticodones</i>	

Pero, como cada molécula de ARN-t lleva consigo un determinado aminoácido, el resultado de la lectura no será otro que colocar sucesivamente, y uno a continuación de otro, **en un orden determinado**, una serie de aminoácidos que luego se unirán entre sí por medio de enlaces peptídicos para formar un polipéptido.

La composición de este polipéptido, es decir, el **número** de aminoácidos, la **naturaleza** de éstos y el **orden** en que se disponen a lo largo de la cadena peptídica, hace que este polipéptido sea distinto de los demás, que tenga su propia **individualidad**.

Ahora bien, como las proteínas están formadas de polipéptidos, la naturaleza de éstas depende, en última instancia, del orden que ocupan en la cadena del ADN las cuatro bases púricas y pirimidínicas. Esto se puede expresar en otros términos diciendo que la **síntesis de las proteínas está dirigida por el ADN** y realizada en virtud de las instrucciones cifradas en dicho ADN y transcritas al ARN-mensajero.

Como acaba de decirse, de la naturaleza del ADN nuclear depende estrechamente la naturaleza de todas las proteínas de la célula, incluso de las proteínas enzimáticas, las cuales, como es sabido, son los agentes de todas las reacciones bioquímicas que allí suceden y, en consecuencia, las responsables de todas



Esquema del mecanismo de la transcripción y de la traducción.

Sobre una de las hebras de la molécula de ADN (a la izquierda) se forma una cadena de ARN-mensajero, cuyas bases están ordenadas de acuerdo con las del ADN (transcripción).

Sobre cada uno de los tripleteas de tres bases del ARN-m (codones), se va colocando la molécula de ARN-t cuyo anticodón se corresponde con él; de este modo se eliminan sucesivamente los aminoácidos transportados por el ARN-t, que van formando una cadena peptídica (traducción).

* N = núcleo; R = ribosoma.

las características de las células, pues todas ellas dependen de una u otra de las reacciones bioquímicas.

Esto equivale a decir que cualquier característica celular depende de la presencia en la célula de por lo menos una enzima cuya síntesis está programada en un segmento del ADN nuclear. Pues bien, el segmento de ADN que contiene el mensaje que ha de dirigir la síntesis de una proteína enzimática recibe el nombre de gen, y en la actualidad se admite que un determinado gen da lugar, en el transcurso del metabolismo celular, a moléculas de una determinada enzima.

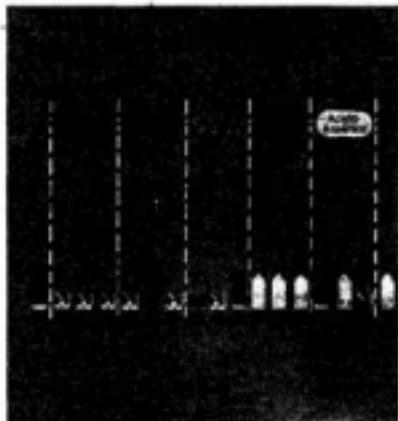
Dada la extraordinaria longitud de las cadenas de ADN que hay en las células, es también extraordinario el número de genes que se contienen en un núcleo. Para dar una idea de ello baste

con decir que en una bacteria, cuyo conjunto de genes o genoma es mucho menor que en otras células, el ADN puede cifrar unas 3.000 proteínas.

EL CODIGO GENETICO

A lo largo de los últimos diez años se han ido resolviendo sucesivamente los problemas referentes a la manera de realizarse la transcripción y la traducción del mensaje genético, e incluso se ha descubierto, prácticamente en su totalidad, la correspondencia existente entre cada uno de los aminoácidos de las proteínas y los tripletes o codones del ARN-m que los cifran, es decir, se ha llegado a conocer y entender el lenguaje en que dicho mensaje viene cifrado.

El «diccionario» de este lenguaje se llama **código genético** o **clave genética**. El código comprende todas las combinaciones posibles entre las cuatro bases, tomadas de tres en tres, es decir, formando **tripletes** o **codones**. Cada uno de estos tripletes de bases en el ARN-m cifra un aminoácido en la cadena polipeptídica, existiendo también un codón para indicar el principio del mensaje, dos codones que indican la terminación del mismo, e incluso uno que señala un espacio entre dos genes sucesivos dentro del mismo mensaje, es decir, que el código genético no solamente contiene palabras, sino también signos de puntuación.



El lenguaje del código genético. A cada combinación de tres bases en el ARN-mensajero corresponde un aminoácido. La cadena peptídica es, pues, la traducción del mensaje contenido en la molécula de ARN-m.

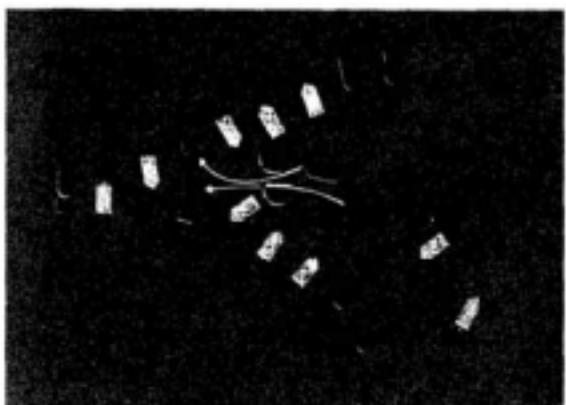
TRANSMISION DEL MENSAJE GENETICO A LAS CELULAS HIJAS

Hemos visto hasta ahora cómo suceden las cosas en el interior de una célula, transmitiéndose el mensaje genético del núcleo al citoplasma, de modo que el ADN nuclear gobierna todas las características celulares.

Pero llega un momento, como sabemos, en que la célula se divide, es decir, se convierte cada célula en dos células. Y es de esperar que en el núcleo de las nuevas células haya también un mensaje cifrado por medio del cual pueda cada célula hija funcionar independientemente de su hermana. Pero, además, las dos células hijas deben funcionar de igual manera, lo que significa que ambas deben de tener un idéntico genoma.

Las investigaciones recientes nos enseñan que esto es posible porque la propia molécula de ADN se convierte a su vez en dos moléculas de ADN exactamente iguales a la primera. Este fenómeno se llama la **duplicación del ADN** y se verifica de la siguiente manera.

Como se sabe, cada molécula de ADN es una doble hélice formada por dos cadenas de polinucleótidos enrolladas una sobre otra, de tal manera que quedan unidas entre sí por las parejas de bases que se combinan de dos en dos formando puentes adenina-timina y citosina-guanina entre ambas cadenas.



Duplicación semiconservadora del ADN. Sobre las dos cadenas viejas (exteriores) se forman unas nuevas cadenas, cuyas bases son complementarias con las de las antiguas. Se forman así dos moléculas iguales de ADN, cada una de ellas con una cadena vieja y una nueva.

Cuando llega el momento de la duplicación, las dos cadenas se separan una de otra, quedando así sus bases libres. Frente a cada una de estas bases que han quedado libres, viene a combinararse un nucleótido de base complementaria; los nucleótidos que así se ordenan enfrente de cada una de las cadenas «viejas» se combinan inmediatamente entre sí para formar una cadena «nueva», de manera que cuando se hayan separado por completo las dos cadenas «viejas» de la doble hélice, se habrán formado dos «nuevas», con un total de cuatro cadenas distribuidas en dos hélices.

Este tipo de duplicación se llama **duplicación semiconservadora**, pues en cada una de las hélices hijas hay **una cadena vieja y una cadena nueva**. Sin embargo, cada doble hélice hija será exactamente igual a la doble hélice materna, ya que, gracias a la complementariedad de las bases, las nuevas cadenas tienen sus bases exactamente en el mismo orden que las viejas.

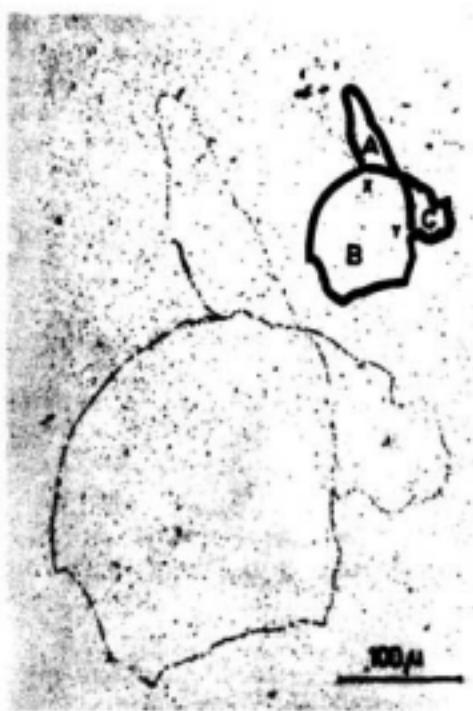
Cada doble hélice pasará ahora a una de las dos células hijas, asegurándose de este modo, gracias a la duplicación semiconservadora, la persistencia de un genoma en las células hijas idéntico al de la célula madre.

LA SEXUALIDAD

El mensaje genético se transmite siempre, como acabamos de ver, de la célula madre a las células hijas en ocasión de la división celular.

Sin embargo, hay ocasiones en que el material genético puede transferirse de una célula a otra célula ajena, no descendiente de ella. Este fenómeno se denomina **sexualidad**.

Como veremos, de ordinario, los fenómenos reproductores van acompañados de una transferencia de material genético y esto sucede precisamente en el caso de la que hemos denominado reproducción sexual, pero hay que tener en cuenta que puede haber reproducción sin sexualidad (división celular, multiplicación vegetativa, reproducción asexual) y también, aunque esto sea menos frecuente, sexualidad sin reproducción.



Un cromosoma bacteriano fotografiado en curso de duplicación, por autorradiografía. En el ángulo superior derecho se ha dibujado una interpretación de la imagen real obtenida. (De Cairns.)

LA CONJUGACION EN LAS BACTERIAS

Para ilustrar esta última posibilidad, describiremos brevemente el caso del fenómeno conocido con el nombre de conjugación en las bacterias.

El material genético bacteriano está constituido, según las modernas investigaciones, por una doble hélice de ADN, conjunto que forma el llamado cromosoma bacteriano. El cromosoma es único en cada bacteria y en él la doble hélice de ADN no tiene principio ni fin, ya que forma un anillo; se trata de un **cromosoma único y anular**. Claro está que, dada la gran longitud de la doble hélice (1,5 mm.), comparada con la talla de la bacteria ($1,5 \mu$), el cromosoma está completamente apelotonado, pero no por eso deja de ser cierto que su forma, cuando está totalmente desenveloperado, es la de un anillo.

Las bacterias, de ordinario, se reproducen por **escisión simple**, de manera que una bacteria se divide en dos, sus dos descendientes crecen y se dividen de nuevo cada una en dos, etc. En cada una de estas escisiones, el cromosoma bacteriano se duplica y a cada una de las bacterias hijas pasa una doble hélice semi-conservada, con una cadena vieja y otra nueva, según hemos visto anteriormente. Se trata de una reproducción no sexual, pues el material genético pasa exclusivamente de la célula madre a las células hijas, sin otro tipo de transferencia genética.

A veces, sin embargo, las bacterias se transfieren unas a otras material genético, es decir, experimentan fenómenos de sexualidad, pero la sexualidad no provoca ningún cambio en el fenómeno reproductor, que seguirá siendo, después del acto sexual, una serie indefinida de actos de escisión simple.

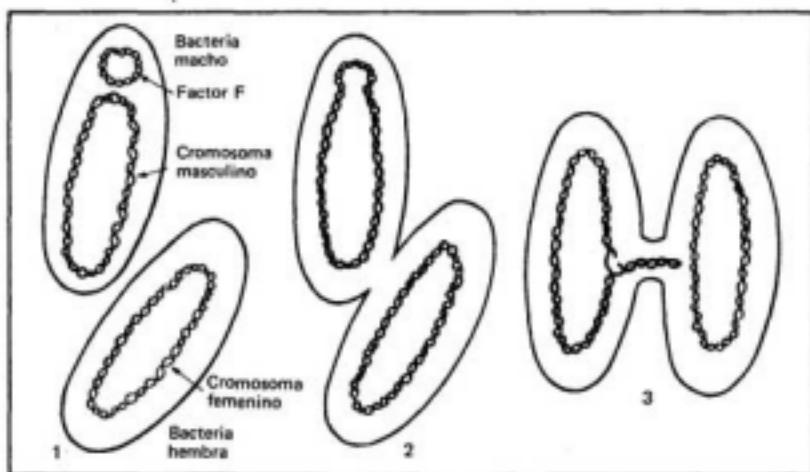
Hay varios fenómenos de sexualidad en las bacterias, pero nos reduciremos a estudiar someramente el caso de la llamada **conjugación**.

La conjugación en las bacterias tiene como preliminar una aproximación entre bacterias de dos tipos, la bacteria que va a donar el material genético y la bacteria que va a recibirla, bacterias que se llaman, respectivamente, el **macho** y la **hembra**.

Desde el punto de vista genético, el macho y la hembra se diferencian en que el macho tiene una característica genética que falta en la hembra, el **factor F**, que es un anillo de ADN. Gracias a este factor, el macho tiene la capacidad de adherirse a la hembra por medio de un apéndice que pone en comunicación ambos citoplasmas.

Gracias también a la posesión del factor F, el macho puede romper entonces su cromosoma anular, que ya tiene, en consecuencia, dos extremos, y enfila uno de ellos hacia el punto de unión, haciéndolo penetrar en el citoplasma de la hembra. Esta transferencia de material genético no suele ser completa, es decir, no suele transferirse entero el cromosoma del macho, sino parte de él.

En el interior de la bacteria hembra habrá ahora dos genomas: el propio femenino completo y el masculino total o parcialmente transferido. Hablando en términos de número de cromosomas, podemos decir que las bacterias son **haploides**, mientras que la bacteria hembra, después que ha recibido el genoma incompleto del macho, se ha convertido en un zigoto parcialmente diploide.



Esquema de la conjugación bacteriana. 1. Bacterias macho (con factor F) y hembra. 2. El factor F se integra en el cromosoma masculino. 3. Parte del cromosoma masculino pasa a la bacteria hembra.

En este zigoto parcial, el fragmento de ADN masculino se dispone paralelamente al ADN femenino y entonces ambos genomas **se intercambian** algunos genes. La bacteria femenina, pues, y sus descendientes, tendrán ahora unas características fisiológicas distintas a las que tenía anteriormente, ya que su genoma ha cambiado en parte. En cuanto al fragmento del cromosoma masculino, desaparece en las descendientes.

Este último proceso, por el cual se intercambian genes entre los cromosomas que aparecen dispuestos paralelamente, se denomina **recombinación**.



GENETICA MENDELIANA

En los seres pluricelulares, los fenómenos reproductores van acompañados, de ordinario, de una transferencia de material genético de unas células a otras, por lo cual se dice que en estos seres se realiza la reproducción sexual.

La consecuencia de esta transferencia genética es que, además de un aumento en el número de individuos, la reproducción da origen a la aparición en los hijos de unas características genéticas que pueden ser distintas de las de sus padres. La sexualidad actúa aquí, pues, como un mecanismo destinado a lograr que los descendientes no sean todos exactamente iguales desde el punto de vista genético.

La distribución de los genes paternos y maternos entre los descendientes de una pareja fue estudiada por primera vez, hace más de un siglo, por el checo Gregorio Mendel, monje agustino, que experimentó con plantas de guisante en el huerto de su convento, por lo que esta parte de la genética se denomina, en su honor, Genética mendeliana.

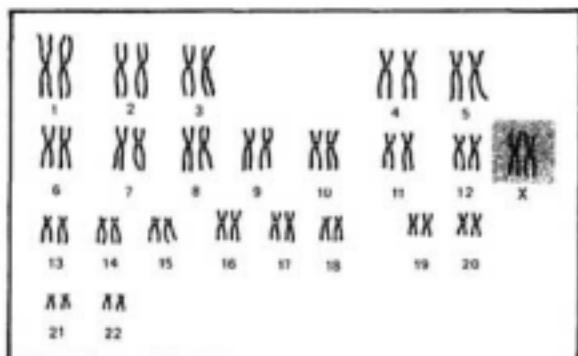
◀ Cuadro pintado en México en el siglo XVII y que hoy está en el Museo de América de Madrid, en el que se ilustra un caso de herencia entre la raza blanca y la indígena.

LOS CROMOSOMAS DE LOS ORGANISMOS DIPLOIDES

Los cromosomas de las células de las fases diploides de los organismos proceden todos, a la larga, de los cromosomas del zigoto, ya que, a través de las diversas generaciones celulares, la mitosis ha asegurado la absoluta identidad de las dotaciones cromosomáticas sucesivas.

Por el contrario los cromosomas del zigoto tienen un doble origen, ya que en la fecundación se han unido en el sincarion los cromosomas de uno de los gametos con los cromosomas del otro. Podemos, pues, afirmar, que la dotación cromosómática total de las células diploides está formada por la suma de dos dotaciones haploides, las de los gametos.

Ahora bien, las dotaciones cromosómicas de ambos gametos, no solamente son iguales en número, sino que están formadas de **cromosomas iguales** en una y otra dotación, correspondiéndose uno a uno los cromosomas paternos con los cromosomas maternos, con la excepción que veremos en su momento. Así, por ejemplo, la mosca del vinagre *Drosophila* (muy utilizada en experimentos de genética) tiene en sus células diploides ocho cromosomas, muy semejantes entre sí, de dos en dos, de manera que hay dos en forma de horquilla; otros dos, también en forma de horquilla, pero un poco más pequeños; dos más en forma de bastón y dos puntiformes; en el hombre existen 46 cromosomas, divididos en 23 pares, etc.



Cromosomas de la especie humana (mujer).



Cromosomas de *Drosophila*. Arriba, macho; abajo, hembra.

Los cromosomas que forman cada pareja se llaman **cromosomas homólogos**, por lo cual podemos ahora añadir que cada uno de los gametos es portador de una dotación de cromosomas, homólogos uno a uno con los cromosomas de la dotación que lleva el otro gameto.

Como en los cromosomas radica el ADN, que sabemos que es el material genético por excelencia, para saber cómo y cuándo se realizan las transferencias genéticas entre las células reproductoras, tendremos que estudiar el comportamiento de los cromosomas en los fenómenos de reproducción, especialmente desde el momento en que se produce la meiosis, con la correspondiente formación de células haploides, hasta que se realiza la fecundación, con el restablecimiento del estado diploide en el zigoto y en las células que de él descienden.

EL INTERCAMBIO GENETICO EN LA MEIOSIS

El fenómeno de la meiosis, que estudiamos anteriormente, tiene una significación genética profunda. Anteriormente aludimos a él como a un mecanismo que, simplemente, reduce a la mitad el número de cromosomas. Un estudio algo más detallado nos dará idea de que es uno de los más importantes fenómenos genéticos, y de que en la meiosis se realiza un intercambio genético de gran trascendencia.

En la profase de la primera división meiótica, los cromosomas, una vez espiralizados, se unen dos a dos, de manera que cada uno de ellos **se aparea con su homólogo**, constituyéndose tantas parejas como sea el número haploide de la especie.

Al cabo de cierto tiempo (tiempo que suele ser muy largo), los cromosomas homólogos están tan estrechamente apareados que los segmentos correspondientes en ambos cromosomas están situados exactamente al mismo nivel. Entonces, cada cromosoma se divide en dos **cromátidas**, dos de origen **paterno** y dos de origen **materno**, que quedan reunidas en una especie de haz llamado **tetrada**.

Más adelante se separan los dos cromosomas homólogos de cada una de las parejas, emigrando cada uno de ellos a un polo

Meiosis



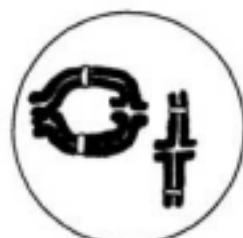
NUCLEO DIPLOIDE ORIGINAL



APAREAMIENTO DE LOS CROMOSOMAS



PROFASE DE LA PRIMERA DIVISION MEIOTICA



FORMACION DE LAS TETRADAS



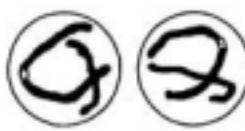
METAFASE DE LA PRIMERA DIVISION MEIOTICA



ANAFASE DE LA PRIMERA DIVISION MEIOTICA



SEGUNDA DIVISION MEIOTICA



LOS CUATRO NUCLEOS HAPLOIDES RESULTANTES



La meiosis. En esta figura se han representado los cromosomas de origen paterno (rojo) y materno (azul), pero no se ha figurado el entrecruzamiento entre los cromosomas de ambas procedencias.

de la célula, en donde se constituyen, pues, dos grupos **haploides** de cromosomas. Esta primera división se llama **reduccional**.

La segunda división, llamada **ecuacional**, repartirá cada una de las cromátidas de cada uno de los cromosomas en otros dos núcleos hijos, de modo que el resultado final es que cada una de las cuatro cromátidas de cada tetrada va a parar a uno de los cuatro núcleos **haploides** resultantes.

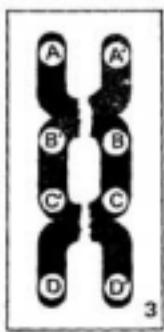
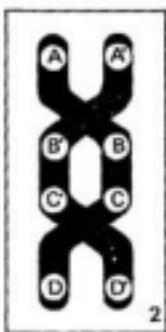
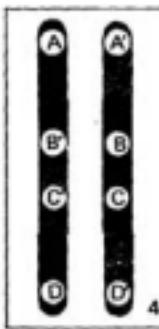
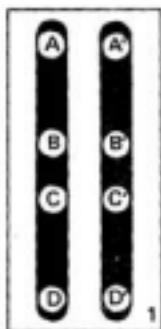
Considerando únicamente los fenómenos tal como acaban de describirse, la consecuencia genética de la meiosis es el **reparto** de las cuatro tetradas (dos de origen paterno y dos de origen materno) entre los cuatro núcleos hijos, es decir, entre los cuatro gametos.

Ahora bien, la distribución de las cromátidas en la división ecuacional se hace al azar, de modo que a un determinado gameto puede ir a parar una cromátida paterna o una cromátida materna. Si tenemos en cuenta que esto ocurre para cada pareja de cromosomas homólogos, nos daremos cuenta de que las combinaciones posibles, atendiendo al origen paterno o materno de los cromosomas, son muchas para cada gameto.

Considerando una hipotética célula con un número diploide de dos cromosomas (circunstancia que apenas se da en la realidad, ya que los números diploides son, en general, mucho más elevados), la cual célula formará, por consiguiente, dos tetradas, y llamando A y B, respectivamente a las cromátidas de una u otra tetrada, los tipos de gametos posibles serán:

1. ^o	2. ^o	3. ^o	4. ^o
A paterna	A paterna	A materna	A materna
B paterna	B materna	B paterna	B materna

Es decir, que habrá gametos que tendrán material genético de procedencia única (el primero y el cuarto), pero también los habrá poseedores de material genético mezclado de origen paterno y de origen materno (el segundo y el tercero). Este tipo de gametos predominará cada vez más a medida que el número de cromosomas sea más elevado.



Entrecruzamiento de los cromosomas (crossing-over).

1. Los cromosomas están apareados. En uno de ellos se hallan los genes A, B, C y D; en el otro, los genes A', B', C' y D'.
2. Los cromosomas se entrecruzan, formándose dos puntos de íntimo contacto o quiasmas.
3. Se produce la ruptura de los cromosomas al nivel de los quiasmas.
4. Los cromosomas se vuelven a soldar, pero ahora en uno radican los genes A, B', C' y D, y en el otro, los genes A', B, C y D'.

Pero aún mayores posibilidades de combinaciones de genes paternos y maternos en los gametos, se aseguran por el fenómeno denominado **entrecruzamiento** de los cromosomas, que ordinariamente se designa con la palabra inglesa *crossing-over*.

EL ENTRECRUZAMIENTO DE LOS CROMOSOMAS

Hemos dicho que el estado de apareamiento de los cromosomas homólogos en la meiosis es un estado que puede durar bastante tiempo, durante el cual las cromátidas están estrechamente adheridas, de manera que los segmentos correspondientes de ellas están al mismo nivel.

Pues bien, durante este largo período, se produce un fenómeno de extraordinaria importancia, que va a permitir que suceda, no sólo una **distribución de las cromátidas entre los gametos**, sino la **combinación de los genes de origen paterno y materno en cada cromátida**.

El proceso tiene lugar de la siguiente manera: En algunos puntos en que las cromátidas paternas y maternas de las tetradas están adheridas, llamados **quiasmas**, se produce una **ruptura simultánea de ambas cromátidas**. A continuación **se sueldan** las cromátidas rotas, pero uniéndose la materna con la paterna, de manera que, en el caso de producirse un solo quiasma, dos de las cromátidas se compondrán en lo sucesivo de una porción de material genético paterno y de otra porción de material genético materno.

Como quiera que la regla es la producción de varios quiasmas en cada uno de los cromosomas, nos daremos cuenta de que a los gametos irán siempre a parar, no unas cromátidas de origen paterno o materno, sino, realmente, en la mayoría de los casos, unas cromátidas de **origen mixto**, lo que hará todavía más variable la dotación genética de cada gameto. Este fenómeno multiplica de tal manera la variabilidad genética de los gametos que se puede afirmar que en las especies con muchos cromosomas (como la especie humana, por ejemplo) no hay nunca dos gametos de iguales características genéticas.

LOS EXPERIMENTOS DE MENDEL

Las líneas anteriores nos han demostrado la enorme dificultad que entraña el estudio de los fenómenos hereditarios, si se trata de abarcar el estudio de la herencia biológica **en su conjunto** en una determinada especie.

Gregorio Mendel, en cambio, tuvo la feliz idea de cruzar plantas de la misma especie que diferían entre sí por **un solo carácter** bien acusado, y observar después el modo de transmisión de este único carácter a los individuos resultantes del cruceamiento. Más adelante, estudió el modo de transmisión hereditaria de **dos características**, y así sucesivamente, y a partir de una extrema simplificación del problema, fue añadiendo variables al mismo.

*Gregorio Mendel, creador de la genética
y autor de las leyes que llevan su nombre.*



El resultado de unos estudios condujo a este investigador al descubrimiento de ciertas leyes, que se llamaron después **leyes de Mendel**, en su honor.

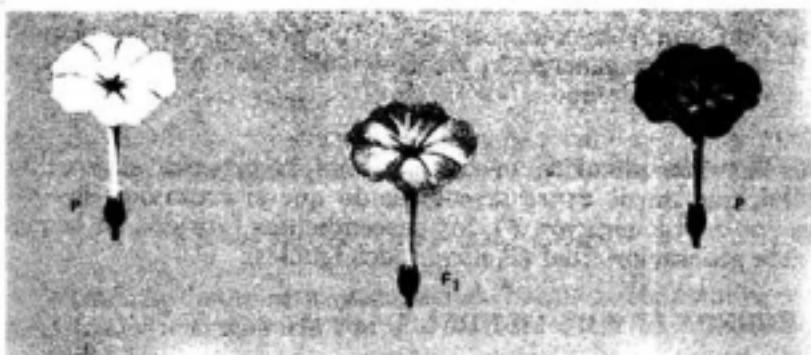
PRIMERA LEY DE MENDEL

La planta llamada vulgarmente **dondiego de noche** tiene dos razas que difieren entre sí porque en una de ellas las corolas de las flores son de **color rojo**, mientras en la otra son de **color marfil**. Se dice que se trata de **razas puras** con respecto a este carácter porque sus descendientes (si cruzamos entre sí por separado progenitores de cada una de las razas) ostentan siempre el mismo color en sus corolas.

Se puede hacer una serie de experimentos para tratar de averiguar cómo se realiza la transmisión a los descendientes del carácter «color de la corola», independientemente de las demás características de las plantas; dado que vamos a fijarnos solamente en dicho carácter, que es distinto en ambas razas de dondiego, decimos que el color rojo y el color marfil constituyen una pareja de **caracteres antagónicos**.

Pues bien, si cruzamos ahora una planta de dondiego de noche con flores **rojas** con otra cuyas flores son de color **marfil**, esto es, si cruzamos progenitores de ambas razas puras, obtendremos una generación de plantas en las que todas las flores tienen las corolas de un color **rosado**, es decir, de un color **intermedio** entre el color de las corolas de una de las razas y el color de las corolas de la otra raza.

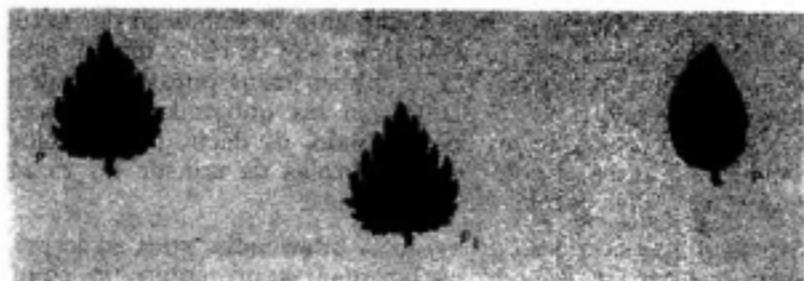
Se dice que es un caso de **herencia intermedia**, pues en la primera generación filial todas las plantas presentan un color intermedio entre los de los progenitores.



Primera ley de Mendel. Caso de herencia intermedia.

Hagamos ahora un experimento semejante con una especie de ortiga en la que hay dos razas, una de ellas con **hojas dentadas** y otra con **hojas enteras**. En esta especie, los caracteres antagónicos no son colores, sino formas distintas en las hojas. Si cruzamos estas dos razas puras, aparece una generación en la que todas las plantas tienen sus hojas iguales, pero no con una forma intermedia entre las formas de las hojas de ambos progenitores, sino dentadas.

En este caso, parece como si la forma de la hoja entera se hubiera dejado **dominar** por la forma dentada, por lo que se dice que es un caso de **herencia dominante**, en la que uno de los caracteres, que se llama precisamente **carácter dominante** (hoja dentada) es el único que se manifiesta en la primera generación filial, mientras que el otro carácter, llamado **carácter recesivo** (hoja entera), no se manifiesta en absoluto en dicha generación.



Primera ley de Mendel. Caso de herencia dominante.

Sin embargo, en los resultados de ambos experimentos hallamos un punto de coincidencia: el 100 por 100 de las plantas de la primera generación filial son **idénticas** con respecto al carácter considerado.

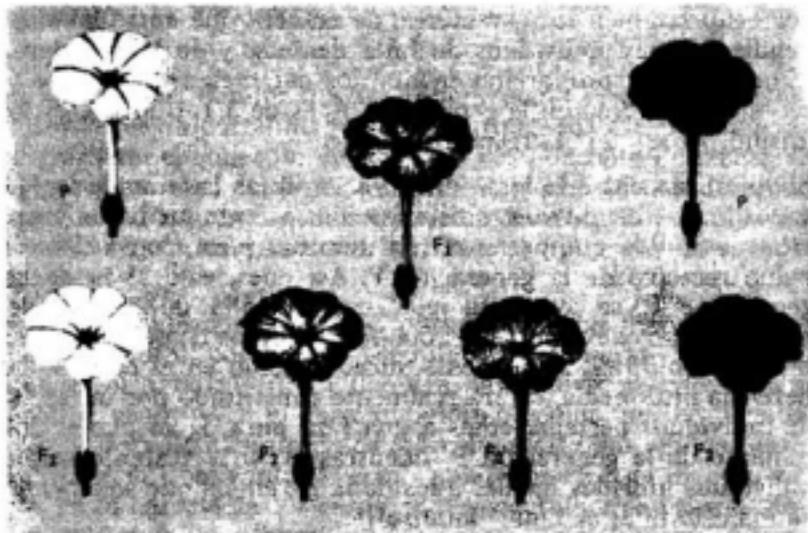
Esto nos sirve para enunciar la primera ley de Mendel, o **ley de la uniformidad de los híbridos de la primera generación filial**, que puede expresarse diciendo que si cruzamos dos razas puras (generación P), los descendientes híbridos de la primera generación filial (F_1) son todos iguales.

SEGUNDA LEY DE MENDEL

Si cruzamos ahora entre sí dos individuos de la generación F_1 , esto es, dos híbridos de la primera generación filial, obtendremos resultados distintos si se trata del caso del dondiego de noche (herencia intermedia), o si se trata del caso de la ortiga (herencia dominante).

Veamos primeramente el caso de la herencia intermedia. Si cruzamos dos plantas de la generación F_1 de dondiego que tendrán, como sabemos, flores de color rosado, intermedio entre los colores de sus progenitores, obtendremos descendientes de tres tipos: con flores rojas, con flores color marfil y con flores rosadas.

Esto quiere decir, que en algunos de los descendientes de esta segunda generación filial (F_2) se han **separado o segregado** los caracteres de las plantas de la generación P, los cuales estaban juntos en la generación F_1 . Esta es la razón por la cual esta segunda ley de Mendel se llama la **ley de la segregación de los caracteres en la segunda generación filial**.



Segunda ley de Mendel. Caso de herencia intermedia.

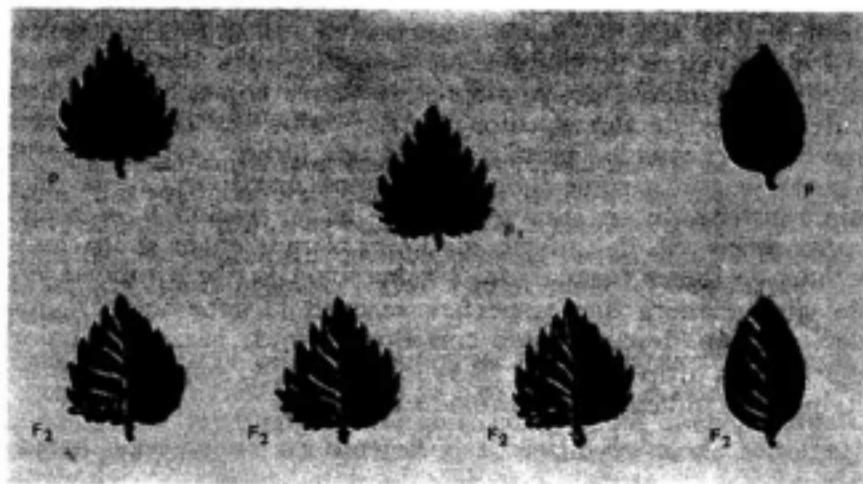
Si además de hacer esta observación, hacemos un estudio estadístico de la **frecuencia** con que en los descendientes de la F_2 aparecen los colores rojo, rosado y marfil, observaremos que se hallan en la proporción 1:2:1, o lo que es igual, en la de 25 % : 50 % : 25 %, respectivamente. Si cruzamos ahora entre sí los individuos de flores rojas de esta generación F_2 , obtendremos solamente descendientes de flores rojas; si cruzamos entre sí los de flores color marfil, todos los descendientes tendrán flores color marfil, lo que nos indica que estos individuos de flores rojas y de flores color marfil son de la misma constitución genética que los de la generación P, es decir, **razas puras**. Si, del mismo modo, cruzamos entre sí los individuos de flores rosadas de la generación F_2 , se comportarán de igual manera que si perteneciesen a la generación F_1 , es decir, darán descendientes con flores rojas, rosadas o color marfil en la proporción del 25 % : 50 % : 25 %, respectivamente, lo que nos indica su constitución **híbrida**.

Hagamos ahora el mismo experimento en un caso de herencia dominante, como, por ejemplo, con las ortigas del ejemplo anterior, en cuyos individuos de la generación F_2 se

segregan también los caracteres, de manera que entre los descendientes hay individuos de **hoja dentada** y de **hoja entera**. Ahora bien, la proporción en que los caracteres **dominante** y **recesivo** aparecen en la generación F_2 es de 3:1, o lo que es lo mismo, 75 % : 25 %, respectivamente.

Si se cruzan entre sí los individuos de hojas enteras de la F_2 , todos los descendientes, sin excepción, ostentarán hojas enteras, mostrando que pertenecen a una raza **pura**, como el individuo recesivo de la generación P. Así pues, este 25 % de la generación F_2 se comporta igual que el 25 % de plantas de flores rojas o color marfil del dondiego. Hemos de pensar, pues, que el otro 75 %, si las cosas suceden como en el caso de la herencia intermedia, estará realmente constituido por un 25 % de individuos pertenecientes a una raza **pura**, igual que el dominante de la generación P, mientras el 50 % restante serán individuos **híbridos** iguales a los de la F_1 , en los que solamente se manifiesta el carácter **dominante**.

Por supuesto, no podemos distinguir en absoluto si una planta determinada con hojas dentadas pertenece al 25 % de raza pura o al 50 % de híbridos, pero si ensayásemos cruzamientos entre los descendientes, obtendríamos resultados que nos proporcionarían este dato.



Segunda Ley de Mendel. Caso de herencia dominante.

GENOTIPO Y FENOTIPO

El caso de los dominantes de la generación F_2 pone de manifiesto otros importantes conceptos utilizados frecuentemente en genética: el concepto de **genotipo** y el concepto de **fenotipo**. El genotipo es el conjunto de **factores genéticos** que determinan los caracteres hereditarios del individuo. El fenotipo es el conjunto de los **caracteres hereditarios aparentes** en el individuo.

Hay individuos con genotipos diferentes y con fenotipos también diferentes, como en el caso de los individuos de toda índole en el dondiego; pero también hay individuos que tienen distinto genotipo y el mismo fenotipo, como los individuos de raza pura dominantes y los individuos híbridos, en los casos de herencia dominante. Y como quiera que se da el caso de que en la naturaleza los casos de herencia dominante son muchísimos más en número que los casos de herencia intermedia, hay siempre que tener en cuenta, al plantear un problema genético si, ante un caso de fenotipo dominante, nos encontramos con un individuo híbrido o con uno perteneciente a una raza pura, alternativa que no podremos resolver más que haciendo un tipo de cruzamiento del que hablaremos después, llamado **retrocruzamiento**.

Resumiendo, pues, la segunda ley de Mendel puede enunciarse de este modo: Los caracteres unidos o combinados en la primera generación filial, se separan o segregan en la generación siguiente en proporciones definidas.

EXPLICACION DE LAS DOS PRIMERAS LEYES DE MENDEL

La explicación de las dos primeras leyes de Mendel se hace sumamente sencilla si admitimos que cada carácter hereditario fenotípico está determinado por **dos factores genéticos**, llamados **genes alejomorfos** o **alelos**, es decir, que en cada individuo, el genotipo es **doble** para cada carácter hereditario aparente.

Estos alelos se vienen designando tradicionalmente por medio de letras, que serán iguales cuando ambos sean del mismo tipo,

como sucede en las razas puras, en las cuales, cada uno de los caracteres antagónicos está determinado por su pareja de dos alelos iguales.

En el caso del dondiego, por tratarse de un caso de herencia intermedia, designaremos los alelos correspondientes por medio de letras mayúsculas y diremos que el genotipo de las plantas de flores rojas es **RR** y el genotipo de las plantas de flores color marfil es **BB**.

En el caso de la ortiga designaremos con letras mayúsculas a los alelos determinantes del carácter **dominante** y con letras minúsculas a los alelos determinantes del carácter **recesivo**; diremos, por tanto, que el genotipo de las plantas de raza pura con hojas dentadas es **DD** y el genotipo de las plantas con hojas enteras es **dd**.

En la gametogénesis, cada uno de los dos miembros de la pareja de alelos que determinan un carácter hereditario va a parar a un gameto, de manera que cada gameto tiene un genotipo único y no doble para cada carácter hereditario, estableciéndose la **doble dotación** en el momento de la fecundación y la correspondiente formación del **zigoto**, que dará origen al nuevo individuo.

Partiendo de esta hipótesis, comprobada por supuesto por miles de experimentos genéticos, veamos lo que sucede al genotipo en los cruzamientos que nos han servido de ejemplo de las leyes primera y segunda de Mendel.

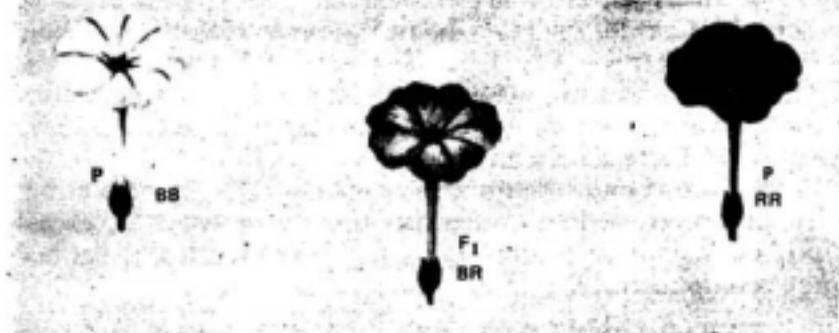
a) Cruce de dos razas puras en caso de herencia intermedia.

En las plantas de razas puras de la generación P, los alelos son **RR** y **BB**, respectivamente.

Todos los gametos formados en la planta **RR** llevan el alelo **R**.

Todos los gametos formados en la planta **BB** llevan el alelo **B**.

Luego, todas las plantas de la generación F₁ llevan la combinación **RB**: son todas iguales y de genotipo idéntico, manifestando también un idéntico fenotipo.



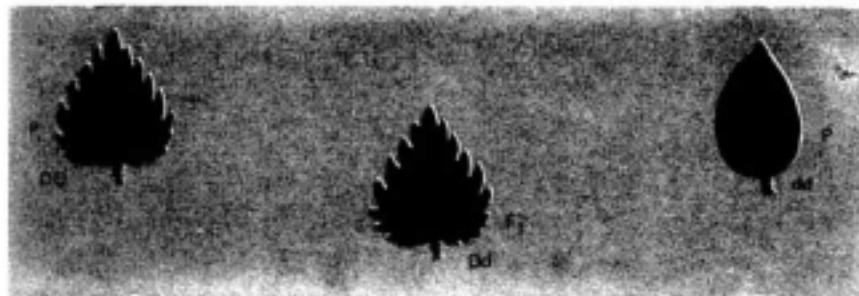
Genotipos y fenotipos en el cruce de dos razas puras en un caso de herencia intermedia.
Los progenitores de la generación P tienen, respectivamente:

- Genotipo homozigótico BB; fenotipo corolas blancas.
 - Genotipo homozigótico RR; fenotipo corolas rojas.
- Todas las plantas de la generación F₁ tienen:
- Genotipo heterozigótico BR; fenotipo corolas rosadas.

b) Cruce de dos razas puras en caso de herencia dominante.

En las plantas de razas puras de la generación P, los alelos son DD y dd, respectivamente.

Todos los gametos formados en la planta DD llevan el alelo D. Todos los gametos formados en la planta dd llevan el alelo d. Luego, todas las plantas de la generación F₁ llevan la combinación Dd: son todas iguales y de genotipo idéntico, manifestando también un idéntico fenotipo.



Genotipos y fenotipos en el cruce de dos razas puras en un caso de herencia dominante.
Los progenitores de la generación P tienen, respectivamente:

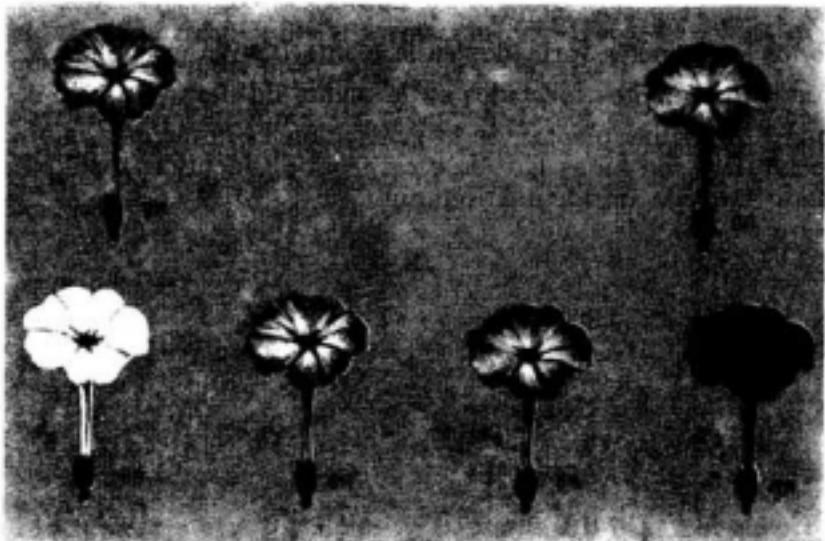
- Genotipo homozigótico dominante DD; fenotipo hojas dentadas.
 - Genotipo homozigótico recesivo dd; fenotipo hojas enteras.
- Todas las plantas de la generación F₁ tienen:
- Genotipo heterozigótico Dd; fenotipo hojas dentadas.

En ambos casos, en el de la herencia intermedia y en el de la herencia dominante, se llama **homozigóticas** a las plantas con genotipo homogéneo (RR, BB, DD o dd), y **heterozigóticas** a las plantas con genotipo heterogéneo (RB o Dd). La diferencia que aquí se advierte entre el caso de la herencia intermedia y el caso de la herencia dominante es que, en el primer caso, el genotipo heterozigótico da un nuevo fenotipo (intermedio entre los de los homozigóticos), mientras que en el segundo, el genotipo heterozigótico determina un fenotipo idéntico al del homozigótico dominante.

Veamos de nuevo ahora lo que sucede al cruzar entre sí los individuos heterozigóticos de la generación F_1 en ambos casos.

a) **Cruce de dos híbridos de la generación F_1 , en caso de herencia intermedia.**

Siendo heterozigótico el genotipo de las plantas de la generación F_1 , habrá **dos tipos de gametos**, de los que el 50 % poseerá el alelo R y el otro 50 %, el alelo B.



Segunda ley de Mendel. Cruce de dos híbridos de la generación F_1 en un caso de herencia intermedia.

Las plantas de la generación F_2 son: Un 25 % de fenotipo corolas blancas.

Un 50 % de fenotipo de corolas rosadas.

Un 25 % de fenotipo corolas rojas.

Estos dos tipos de gametos se unirán de dos en dos al azar y, por consiguiente, siendo en igual número, se darán las siguientes combinaciones: 25 % RR; 25% BB; 50 % BR, que darán, respectivamente, los siguientes fenotipos: 25 % flores rojas; 25 % flores color marfil; 50 % flores rosadas.

b) **Cruce de dos híbridos de la generación F_1 en caso de herencia dominante.**

También en este caso es heterozigótico el genotipo de las plantas de la generación F_1 , por lo que habrá igualmente dos tipos de gametos, de los que el 50 % poseerá el alelo D y el otro 50 % el alelo d.

Al unirse al azar los dos tipos de gametos, que están en igual número, se darán las siguientes combinaciones: 25 % DD; 25 % dd; 50 % Dd, que darán, respectivamente, los fenotipos siguientes: 25 % hojas dentadas; 25 % hojas enteras; 50 % hojas dentadas. O lo que es igual: dado que los fenotipos correspondientes a los genotipos DD (homozigótico dominante) y dd (heterozigótico) son idénticos, podemos decir que los fenotipos resultantes del citado cruzamiento son: 75 % hojas dentadas; 25 % hojas enteras.



Segundo ley de Mendel.

Cruce de dos híbridos de la generación F_1 en un caso de herencia dominante.

Las plantas de la generación F_2 son:

Un 75 % de fenotipo hojas dentadas.
Un 25 % de fenotipo hojas enteras.

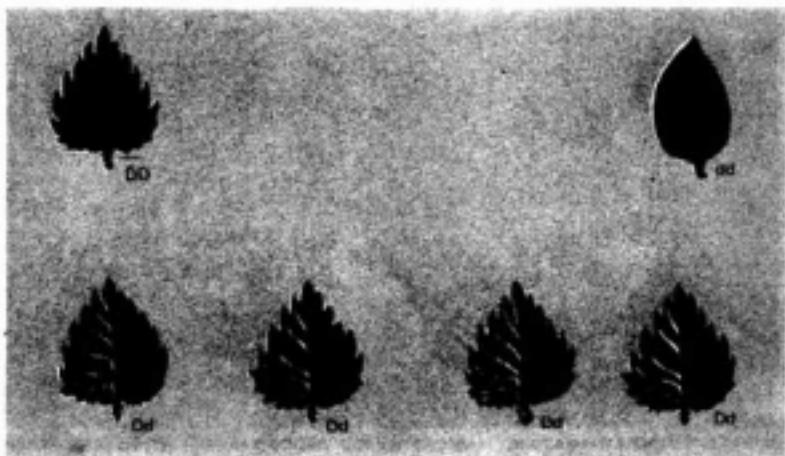
RETROCRUZAMIENTO

Acabamos de ver que en los casos de herencia dominante no se pueden distinguir, entre las plantas de fenotipo dominante, cuáles son las que poseen un genotipo homozigótico dominante y cuáles poseen un genotipo heterozigótico, simplemente por la observación y estudio anatómico o fisiológico de los ejemplares.

Sin embargo, para cada uno de los individuos podemos averiguar el genotipo, verificando su **cruzamiento con el homozigótico recesivo**, lo cual es fácil, ya que éste se conoce perfectamente por tener un fenotipo propio. Veamos, pues, los resultados de esta operación que se denomina **retrocruzamiento**.

En el caso de que crucemos con el homozigótico recesivo el **homozigótico dominante**, nos hallaremos de nuevo ante el cruce de dos individuos de razas puras, iguales que los de la generación P, por lo que todos los hijos serán **heterozigóticos y de fenotipo dominante**.

En el ejemplo de las ortigas, este caso consistirá en el cruce de un individuo DD con uno dd, con formación de gametos D en uno de los individuos y de gametos d en el otro, con lo que todos los hijos tendrán genotipo Dd y, por consiguiente, **fenotipo hojas dentadas**.



Retrocruzamiento de una planta de genotipo homozigótico dominante: Todas las plantas hijas serán heterozigóticas y de fenotipo dominante.



Retrocruzamiento de una planta de genotipo heterozigótico:

El 50 % de las plantas hijas serán heterozigóticas y de fenotipo dominante; el otro 50 % serán homozigóticas y de fenotipo recesivo.

En el caso de que crucemos con el homozigótico recesivo el heterozigótico, nos hallaremos ante una nueva situación.

El individuo homozigótico recesivo producirá gametos todos iguales, poseedores del mismo alelo recesivo, mientras que el heterozigótico dará lugar a dos clases de gametos, unos portadores del alelo dominante y otros portadores del alelo recesivo, a partes iguales. A la hora de producirse la fecundación, habrá igual número de probabilidades de que se unan con el gameto portador del alelo recesivo, un gameto portador del mismo alelo recesivo o un gameto portador del alelo dominante, con lo cual el 50 % de los hijos serán homozigóticos recesivos, de fenotipo recesivo, y el otro 50 % serán heterozigóticos, de fenotipo dominante.

En el ejemplo de las ortigas, este caso consistirá en el cruce de un individuo Dd con uno dd, con formación de gametos D y de gametos d en uno de los individuos y únicamente de gametos d en el otro, con lo que el 50 % de los hijos tendrán genotipo Dd, con fenotipo hojas dentadas y el otro 50 % genotipo dd, con fenotipo hojas enteras.



LOS CROMOSOMAS EN LA HERENCIA

Sabiendo que cada característica hereditaria está determinada en el zigoto y en las demás células diploides por la presencia en ellas de los dos genes alelos correspondientes, y sabiendo también que el material genético se localiza en los cromosomas, es lógico suponer que los genes alelos para un determinado carácter se hallan precisamente en los cromosomas homólogos.

De este modo, cuando en la meiosis se separan dichos cromosomas homólogos, cada una de las cromátidas llevará consigo un alelo de origen paterno o materno, distribuyéndose así por igual los alelos en los cuatro gametos correspondientes.

También es forzoso suponer que los alelos que determinan un cierto carácter ocupan puntos idénticos en cada uno de los dos cromosomas homólogos, con lo cual en la meiosis, al aparearse dichos cromosomas homólogos, quedarán enfrentados los alelos mismos, de manera que siempre vayan a parar a cromátidas distintas incluso si se producen casos de intercambio de segmentos de cromátidas por el fenómeno del «crossing-over».

Hoy sabemos que, en efecto, los genes nucleares radican en los cromosomas homólogos, de manera que la mayoría de los casos de la genética mendeliana se pueden explicar por el comportamiento de los cromosomas.

LA TERCERA LEY DE MENDEL

En los capítulos precedentes se han estudiado casos de herencia intermedia y de herencia dominante, pero siempre referidos a individuos o a razas que difieren entre sí por una sola característica hereditaria. Veamos ahora lo que sucede si cruzamos entre sí representantes de dos razas cuyas diferencias se hacen patentes por dos caracteres, con lo cual habremos de manejar dos parejas de caracteres antagónicos y también dos parejas de alelos.

El ejemplo clásico es el cruzamiento de dos razas de guisantes diferentes por el color de la semilla y por el aspecto exterior de esa misma semilla. Con respecto al color, los caracteres antagónicos son el **color amarillo** y el **color verde**, y con respecto al aspecto exterior de la semilla, el **aspecto liso** y el **aspecto rugoso**.

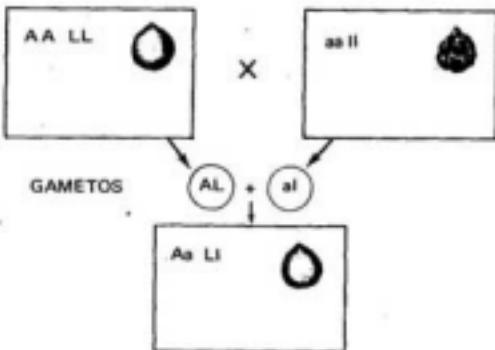
Pues bien, si cruzamos, como hizo Mendel, plantas de una raza cuyas semillas son **amarillas y lisas** con plantas de otra raza de semillas **verdes y rugosas**, obtendremos una generación F_1 compuesta en su totalidad de plantas con semillas **amarillas y lisas**, con lo que se pone de manifiesto que se trata de un caso de herencia dominante, en el cual los caracteres «amarillo» y «liso» son dominantes, y recesivos los caracteres «verde» y «rugoso».

En virtud de la primera ley de Mendel, todos los híbridos de esta primera generación filial son iguales.

Cruzando ahora entre sí dos plantas de la generación F_1 , obtendremos una generación F_2 , que se presentará en las siguientes proporciones: 9 **amarillas y lisas**; 3 **amarillas y rugosas**; 3 **verdes y lisas**; 1 **verde y rugosa**.

Si designamos por **A** el alelo determinante del color amarillo, por **a** el del color verde, por **L** el del aspecto liso y por **l** el del aspecto rugoso, podremos explicarnos el resultado de la siguiente manera:

Las plantas de guisantes de la generación P , por ser razas puras, son homozigóticas y responden a los genotipos **AALL** (fenotipo amarillo-liso) y **aall** (fenotipo verde-rugoso). Los gametos de ambos son, respectivamente, de fórmula genotípica **AL**



GAMETOS

AL **AI** **aL** **ai**
25% 25% 25% 25%

GAMETOS		AL	AI	aL	ai	
	AL	AALL (yellow smooth)	AA Ll (yellow wrinkled)	Aa LL (yellow smooth)	Aa Ll (yellow wrinkled)	F ₂
		AA Ll (yellow wrinkled)	AA ll (green wrinkled)	Aa Ll (yellow wrinkled)	Aa ll (green wrinkled)	
	AI	Aa LL (yellow smooth)	AA LL (yellow smooth)	aa LL (green smooth)	aa Ll (green wrinkled)	
		Aa Ll (yellow wrinkled)	Aa ll (green wrinkled)	aa Ll (green wrinkled)	aa ll (green wrinkled)	
	aL	aa LL (green smooth)	aa Ll (green wrinkled)	aa LL (green smooth)	aa ll (green wrinkled)	
		aa Ll (green wrinkled)				
	ai	aa LL (green smooth)	aa Ll (green wrinkled)	aa LL (green smooth)	aa ll (green wrinkled)	
		aa Ll (green wrinkled)				

Tercera ley de Mendel. Herencia de dos pares de caracteres. Cruce de guisantes amarillos y lisos con guisantes verdes y rugosos.

y al. Por consiguiente, su unión da una generación F_1 , de genotipo $AaLl$ y fenotipo amarillo-liso. Los miembros de esta generación F_1 se llaman **dihíbridos**, en atención a que son híbridos para dos caracteres hereditarios.

La población amarilla-lisa de la F_1 es **heterozigótica** para ambos caracteres; si suponemos que los alelos Aa están en una pareja de cromosomas homólogos, y los alelos Ll en otra pareja de cromosomas homólogos distinta, en los gametos sucederán las siguientes combinaciones, con el mismo grado de probabilidad:

AL, Al, aL, al

Y como, a su vez, los gametos se combinarán de dos en dos al azar, resultarán las combinaciones que se señalan en el cuadro siguiente:

Gametos femeninos	AL	Al	aL	al	
Gametos masculinos	AL	AALL	AALl	AaLL	AaLl
	Al	AALL	AAll	AaLL	Aall
	aL	AaLL	AaLl	aaLL	aaLl
	al	AaLl	Aall	aaLl	aall

Los genotipos de esta generación F_2 estarán, por consiguiente, en las proporciones: 1 AALL : 2 AALl : 1 AAll : 2 AaLL : 4 AaLl : 2 Aall : 1 aaLL : 2 aaLl : 1 aall.

Y como las combinaciones AALL, AALl, AaLL y AaLl tienen un fenotipo amarillo-liso; las combinaciones AAll y Aall, un fenotipo amarillo-rugoso; las combinaciones aaLL y aaLl, un fenotipo verde-liso, y la combinación aall, un fenotipo verde-rugoso, la distribución fenotípica de la generación F_2 será la indicada anteriormente de 9 amarillo-liso : 3 amarillo-rugoso : 3 verde-liso : 1 verde-rugoso.

Al examinar los datos anteriores nos damos cuenta de que los descendientes del cruzamiento de los **dihíbridos** están en las proporciones fenotípicas definidas por la fórmula (3 : 1)².

En el caso de los **trihíbridos** (híbridos de razas que difieren por tres características) la población de la generación F₂ está en las proporciones definidas por la fórmula (3 : 1)³, y, en general, en el caso de los polihíbridos, la fórmula correspondiente es (3 : 1)ⁿ, siendo n el número de características por el que se diferencian entre sí los homozigóticos (razas puras) de la generación P.

Las proporciones genotípicas de los mismos son las que corresponden a las fórmulas siguientes:

Dihíbridos: (1 : 2 : 1)².

Trihíbridos: (1 : 2 : 1)³.

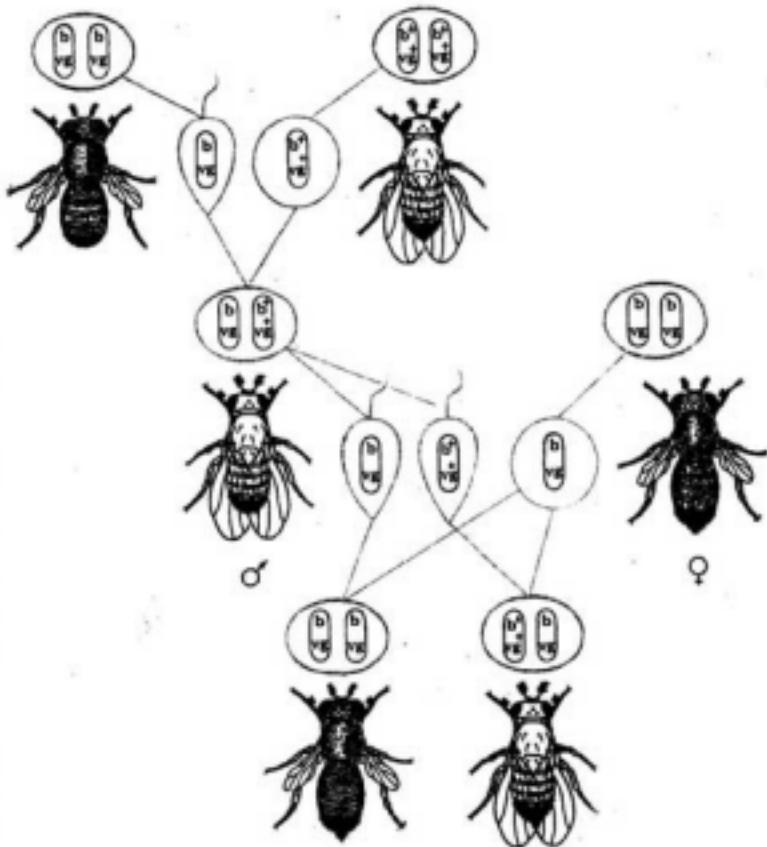
Polihíbridos: (1 : 2 : 1)ⁿ.

El análisis de los descendientes de los cruzamientos de los dihíbridos, de los trihíbridos y, en general, de los polihíbridos llevaron a Mendel a enunciar su **ley de la Independencia de los caracteres** o tercera ley de Mendel, que se puede exponer así: Cada uno de los caracteres hereditarios se transmite a los descendientes con absoluta independencia de los demás.

GENES LIGADOS

La tercera ley de Mendel se cumple exactamente cuando las parejas de alelos determinantes de los caracteres hereditarios radican en **cromosomas distintos**.

Ahora bien, el número de características hereditarias es muy superior al número de parejas de cromosomas homólogos en las células diploides, por lo que existen muchos caracteres cuyos genes determinantes están localizados en el **mismo cromosoma**. En este caso, al separarse las cromátidas en la meiosis, pasarán a un solo gameto los genes comprendidos en el mismo cromosoma y en los hijos aparecerán **juntos** los caracteres correspondientes. Estos genes, localizados en el mismo cromosoma y que, por consiguiente, se transmiten juntos a la descendencia se denominan **genes ligados**.

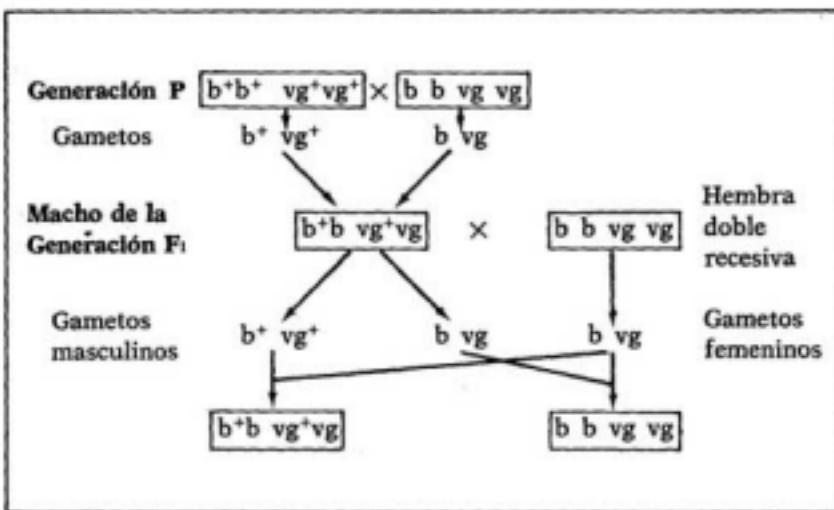


Genes ligados. Ligamiento completo de los genes b^+ b y vg^+ vg de *Drosophila*.

Así sucede, por ejemplo, en la herencia del color del cuerpo y de cierta anomalía de las alas en la mosca *Drosophila*.

Si cruzamos una hembra de **cuerpo gris** (b^+) y **alas normales** (vg^+) con un macho de **cuerpo negro** (b) y **alas vestigiales** (vg), todos los individuos de la generación F_1 serán de **color gris** y tendrán **alas normales**, lo que significa que estos dos alelos son

los dominantes (1). Si ahora se hace un retrocruzamiento con este dihíbrido, cruzando un **macho de la F₁**, con una **hembra doble recesiva**, de color negro y alas vestigiales, el 50 % de los hijos tendrá **color gris y alas normales** y el otro 50 % tendrá el **color negro y las alas vestigiales**. En este caso, en la formación de los gametos del híbrido de la generación F₂ no aparecen **cuatro tipos de combinaciones genéticas**, como en el caso del guisante anteriormente expuesto, sino solamente **dos**, de acuerdo con el siguiente esquema:



En el caso expuesto hay un **ligamiento completo** entre los alelos b^+ y vg^+ , por un lado, que están sobre un mismo cromosoma, y los alelos b y vg , por otro, que están en otro cromosoma. Pero hay que advertir que en la mayoría de las ocasiones el ligamiento es **incompleto**, ya que, en virtud del fenómeno del «crossing-over», suele suceder que se produzca un quiasma entre el lugar que ocupa una de las parejas de alelos y el lugar que ocupa la otra pareja en el mismo cromosoma, con lo cual uno de los alelos pasa a la cromátida homóloga, separándose así los genes ligados. Esto sucede en un determinado número de cromosomas y, en consecuencia, los resultados estadísticos del experimento quedan alterados en mayor o menor grado.

(1) Lo que se indica con el signo +.

LA HERENCIA DEL SEXO

El sexo de los animales (y también el de las plantas en los casos en que los sexos estén separados en pies distintos) es también un carácter hereditario. Por regla general, como sabemos, existen dos tipos de individuos, masculinos y femeninos, y ambos tipos existen en las poblaciones animales en igual proporción.

Ahora bien, si tratamos de encuadrar la herencia del sexo en alguno de los tipos de herencia mendeliana hasta ahora estudiados, nos encontraremos con la imposibilidad de que los animales masculinos o femeninos sean **homozigóticos** (o razas puras) con respecto a dicho carácter. En efecto, si lo fuesen, de acuerdo con la primera ley de Mendel, al cruzarse un macho con una hembra (que representarían a la generación P), la prole resultante sería siempre del mismo sexo (si se tratase de un caso de herencia dominante) o con características sexuales intermedias (si se tratase de un caso de herencia intermedia).

La experiencia nos muestra que, por el contrario, la prole de una pareja animal suele estar compuesta a su vez de machos y hembras y, considerando un número suficientemente grande de parejas, en las proporciones 1 : 1.

Pero si tanto los machos como las hembras fuesen **heterozigóticos** con respecto al referido carácter, nos hallaríamos ante un caso similar al del cruce de los monohíbridos de la generación F₁, cuyos resultados no coinciden con los que en la realidad se producen.

Hemos de aceptar, por consiguiente, que, de tratarse de un caso de herencia mendeliana, será el equivalente a un **retrocruzamiento**, es decir, al cruzamiento de un individuo heterozigótico con un homozigótico recesivo; cruzamiento que nos dará, como hemos visto, un 50 % de individuos heterozigóticos y un 50 % de individuos homozigóticos recesivos, repitiéndose así, y en iguales proporciones, los tipos de la generación que se ha cruzado.

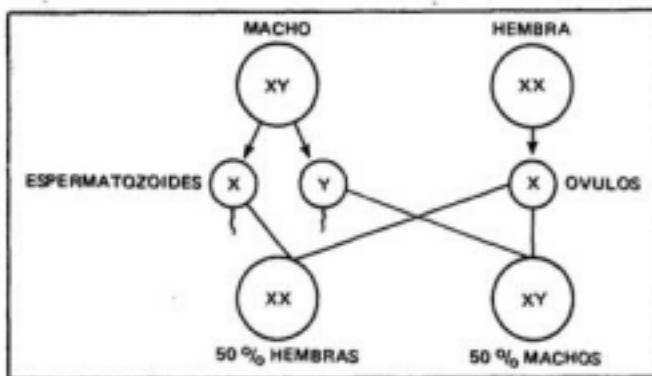
El estudio de las dotaciones cromosomáticas de los machos y hembras de gran número de especies animales nos ha enseñado que, efectivamente, existe un paralelo entre la situación a que acabamos de aludir y el caso de la herencia del sexo, aunque hay que hacer constar que en el caso general del retrocruzamiento se opera con genes, y en el de la herencia del sexo, con cromosomas.

Cuando estudiamos los organismos diploides y la constitución cromosomática de sus células dijimos que ambas dotaciones, paterna y materna, que forman la dotación diploide, están formadas por cromosomas homólogos que se aparean dos a dos en la meiosis. Hay que decir ahora que en uno de los sexos (en general, en el sexo masculino) una de estas parejas de cromosomas homólogos está formada por dos cromosomas ligeramente distintos. En la *Drosophila*, por ejemplo, esta pareja está formada en las células del macho por un cromosoma en forma de bastoncito y otro de mayor longitud, terminando en una especie de cayado, mientras que en las células de la hembra la pareja correspondiente está constituida por dos cromosomas idénticos en forma de bastoncito. En la especie humana, las células del varón tienen una pareja formada por un cromosoma grande y otro mucho más pequeño, poseyendo en cambio las células femeninas la referida pareja formada por dos cromosomas en todo idénticos al grande del varón.

Se ha convenido en denominar **cromosoma X** al que está doblemente representado en la hembra y en un solo ejemplar en el macho, y **cromosoma Y** al que solamente se encuentra en las células de este último.

De todo esto se deduce que las hembras de la mayoría de los animales son **homogaméticas** con respecto al sexo, esto es, que darán siempre gametos iguales, todos con un cromosoma X, y que los machos, en cambio, son **heterogaméticos** a este respecto, puesto que sus espermatozoides serán de dos tipos, uno con cromosoma X y otro con un cromosoma Y.

El sexo del nuevo individuo vendrá determinado por el espermatozoide que llegue a fecundar al óvulo femenino, de acuerdo con el siguiente esquema:



Se ha convenido también en designar a esta pareja de cromosomas con el nombre de **cromosomas sexuales** o **heterocromosomas**, para distinguirlos del resto de las parejas de cromosomas homólogos, llamados **autosomas**.

Digamos finalmente que este esquema, aunque tiene una validez general, no es el único que sirve para la determinación del sexo, y así, por ejemplo, en las aves, en la mayor parte de los peces y en casi todos los lepidópteros existen también parejas de heterocromosomas, pero siendo heterogamética la hembra en lugar del macho; en los ortópteros y otros animales el macho es heterogamético, pero no existe cromosoma Y, de manera que la fórmula genética masculina es XO, mientras que la de la hembra es, como en los mamíferos, XX, existiendo aún sistemas más complejos.

HERENCIA LIGADA AL SEXO

Los heterocromosomas, aunque contienen fundamentalmente los genes determinantes del sexo de los individuos, poseen igualmente algunos genes que influyen sobre caracteres hereditarios no relacionados con la sexualidad. Es lógico suponer, pues, que la herencia de estos caracteres esté relacionada con el sexo de los individuos que los hereden, por lo que se denominan caracteres ligados al sexo.

Se conocen bien dos de estos casos, los dos en la especie humana y los dos relativos a genes recesivos determinantes de anomalías. Se trata del **daltonismo** y de la **hemofilia**.

El daltonismo es una anomalía que impide distinguir al que la sufre entre los colores rojo y verde. El gen correspondiente está situado en el cromosoma X y no se manifiesta si existe en la célula por lo menos un cromosoma X que contenga al alelo normal. Por consiguiente, se podrán dar los siguientes casos:

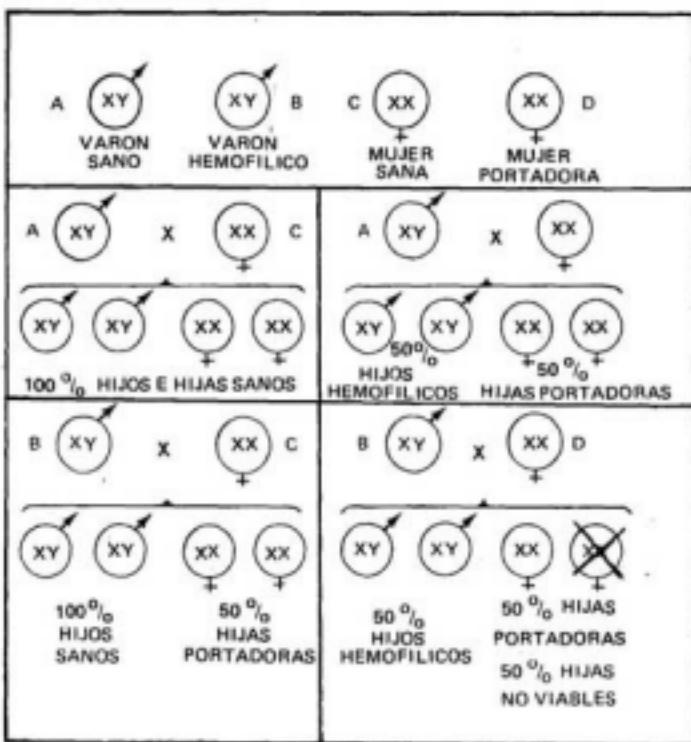
- A) Varón con cromosoma X normal. Visión correcta.
- B) Varón con cromosoma X con gen «daltónico». Visión incorrecta.
- C) Mujer con los dos cromosomas X normales. Visión correcta.
- D) Mujer con un cromosoma X normal y otro con gen «daltónico». Visión correcta.
- E) Mujer con ambos cromosomas X con gen «daltónico». Visión incorrecta.

En la figura adyacente se muestran los resultados de los matrimonios entre los diversos tipos que acabamos de mencionar.

A XY	B XY	C XX	D XX	E XX
VARON VISION CORRECTA	VARON DALTONICO	MUJER VISION CORRECTA	MUJER VISION CORRECTA	MUJER DALTONICA
A XY X XX C	A XY X XX D	XY X XX E		
XY XY XX XX 100 % HIJOS E HIJAS VISION CORRECTA	XY XY XX XX 50 % HIJOS DALTONICOS	XY XY XX XX 100 % HIJOS DALTONICOS		
XY XY XX XX 100 % HIJOS E HIJAS VISION CORRECTA	XY XY XX XX 50 % HIJOS DALTONICOS	XY XY XX XX 100 % HIJOS DALTONICOS		

Arriba: Clases de personas en relación con el daltonismo. El cromosoma X portador del gen «daltónico» se ha dibujado en rojo.

Abajo: Resultados de los cruces entre varones y mujeres en relación con el daltonismo.



Arriba: Clases de personas en relación con la hemofilia. El cromosoma portador del gen "hemofílico" se ha dibujado en rojo.

Abajo: Resultados de los cruces entre varones y mujeres en relación con la hemofilia.

El caso de la **hemofilia** es semejante al anterior. Esta anomalía hereditaria consiste en una incapacidad de coagulación de la sangre, que hace singularmente azarosa la vida del individuo que la padece, el cual está en grave peligro al menor percance.

El gen morboso que determina la hemofilia radica también en el cromosoma X y tampoco se manifiesta si en la misma célula existe un cromosoma X normal. La diferencia que existe entre ambas anomalías con respecto a su herencia radica en que las mujeres con los dos cromosomas X portadores del gen «hemofílico» no llegan a nacer, por lo que no existen más que los siguientes casos:

- A) Varón con cromosoma X normal. Sano.
B) Varón con cromosoma X con gen «hemofílico». Enfermo.

- C) Mujer con los dos cromosomas X normales. Sana.
- D) Mujer con un cromosoma X normal y otro con gen «hemofílico». Sana, pero portadora del gen morboso.

La trascendencia de este último caso es notable, pues, como se puede apreciar en las figuras adyacentes, no existe ninguna mujer hemofílica, pero las portadoras del gen morboso, aunque aparentemente sanas, transmiten la enfermedad a la mitad de sus hijos varones.



LAS MUTACIONES

Hemos visto que el material genético se transmite sin modificarse a través de las generaciones de seres vivos, es decir, que está dotado de una gran estabilidad. En esta estabilidad es donde, precisamente, reside el fundamento de la herencia biológica, ya que permite la transmisión de un mismo carácter de unos individuos a otros. En ciertos casos, sin embargo, el material genético puede modificarse, y sufre unos cambios denominados mutaciones. Pero como a su vez, este material genético modificado sigue siendo muy estable, las modificaciones sufridas persistirán a lo largo de una serie de generaciones, lo que equivale a decir que las mutaciones son también heredables.

Se pueden definir, pues, las mutaciones como unos cambios genéticos súbitos que se transmiten a las generaciones siguientes.

Las verdaderas mutaciones afectan a una porción muy pequeña de la cadena de ADN; por lo cual de ordinario solamente se modifica un gen: se denominan mutaciones génicas. No obstante, por extensión (y también por el hecho de que fenotípicamente se manifiestan a veces de modo muy parecido) se llaman también mutaciones los cambios sufridos por un cromosoma (mutaciones cromosómicas) así como las alteraciones en el número de los cromosomas en el núcleo celular (mutaciones genómicas).

¶ Una mutación que se produce en muchos grupos de animales es el albinismo. En esta fotografía se ve a un gorila albino, "Copito de Nieve", en el Parque Zoológico de Barcelona.

MUTACIONES GENICAS

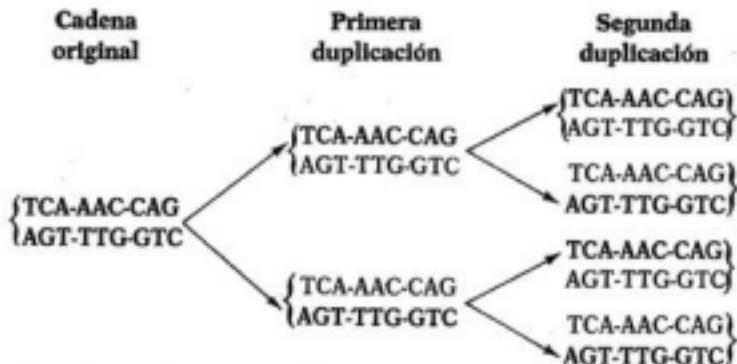
Como se recordará, las características génicas del ADN dependen del orden en el que las bases púricas y primidínicas están colocadas a lo largo de su cadena.

Al duplicarse el ADN, las nuevas cadenas resultantes de esta duplicación «semiconservadora» son una **copia exacta** de la cadena original, ya que en las bases están colocadas en aquellas en el mismo orden que en ésta. A veces, sin embargo, se cometen «errores» en esta copia, de manera que una de las cadenas hijas no es una copia exacta de la cadena madre, sino diferente de ella en una base: se ha producido una mutación genética.

Si este error se comete en una de las células madres de los gametos, resultará que una de las cadenas (la intacta) irá a parar a uno de los gametos, mientras que la otra (la mutada) irá a parar a otro, siendo ambos gametos, pues, portadores de un distinto mensaje genético.

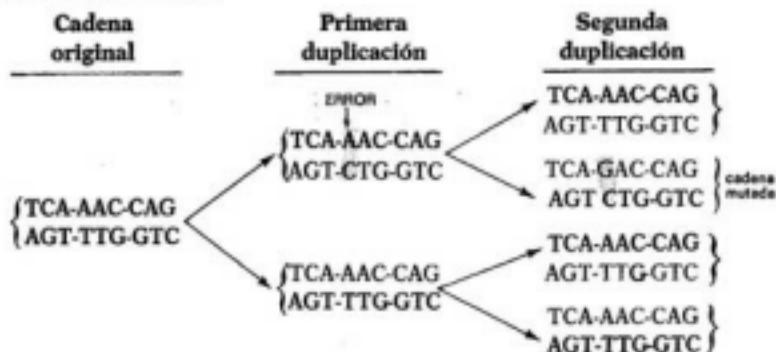
Aclaremos esto con un ejemplo teórico: Supongamos que en una cadena de ADN de una célula hay un gen formado por una secuencia de nueve bases y, por consiguiente, constituido por tres tripletes, lo que significa que este gen determinaría en la síntesis proteica la realización de una cortísima proteína formada por sólo tres aminoácidos.

He aquí la cadena y su duplicación semiconservadora normal:



(Se han figurado en rojo las semicadenas «nuevas» en cada generación.)

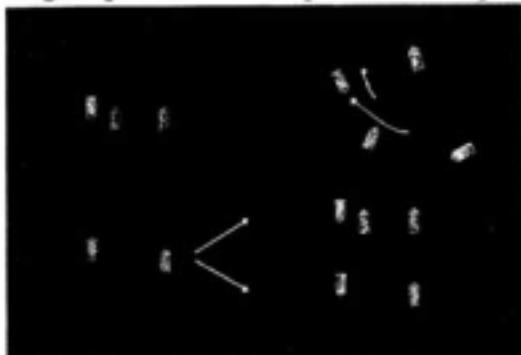
Supongamos ahora que una de las veces en que se produce la duplicación se comete un «error» y la adenina primera del segundo triplete, en lugar de aparearse con una timina, lo hace con una citosina:



A consecuencia del error se han formado cadenas hijas que difieren con respecto a una de las bases. Estas cadenas, situadas después en gametos distintos, les transmitirán unas **características genéticas diferentes**. Concretamente, ambas cadenas darán nacimiento en su momento a ARN mensajeros que diferirán en una base y, por consiguiente, las proteínas cifradas en los dos mensajeros serán también diferentes porque uno de sus tres aminoácidos será distinto.

ALELOS MULTIPLES

Lo dicho hasta ahora bastará para comprender que las entidades que hasta ahora hemos manejado bajo el nombre de **genes alelos** son, sencillamente, **distintas formas de un gen** que han surgido por mutación a partir de uno primitivo.



Esquema de la aparición de una mutación génica por un error en el apareamiento de bases, dando origen a una molécula de ADN mutada (M).

En los ejemplos hasta ahora expuestos, solamente se consideraban dos alelos para cada gen, como el color amarillo o verde de las semillas de un guisante. Sin embargo, conociendo que cada gen está formado por un largo segmento de una cadena de ADN, en el que pueden haber varios tipos de errores, podemos suponer, como en efecto así sucede, la existencia de **alelos múltiples** para cada gen, es decir, que un gen puede mutar de **varias maneras distintas** y dar origen, en consecuencia, a distintas manifestaciones fenotípicas de un mismo carácter.

La herencia de los grupos sanguíneos en la especie humana puede servir para ilustrar este caso.

HERENCIA DE LOS GRUPOS SANGUÍNEOS

Es un hecho muy conocido que los seres humanos difieren por la naturaleza bioquímica de su sangre, distribuyéndose los nombres en cuatro grupos sanguíneos, según la presencia o ausencia en ellos de unos **aglutinógenos** o sustancias aglutinables en los glóbulos rojos y de unas **aglutininas** o sustancias aglutinantes en el plasma sanguíneo. Existen dos tipos de aglutinógenos, que se llaman **A** y **B**, y dos tipos de aglutininas, **a** y **b**, que actúan precisamente sobre el aglutinógeno correspondiente.

Claro está que la sangre cuyos glóbulos tienen aglutinógeno A no podrá tener en su plasma la aglutinina a, ya que sus glóbulos se aglutinarían, impidiéndose la circulación, y lo mismo se puede decir del aglutinógeno B y de su correspondiente aglutinina.

Del mismo modo, hay que tener presente que al mezclar sangres humanas de distintas procedencias (en transfusiones, por ejemplo) serán incompatibles la presencia de aglutinógenos y aglutininas del mismo tipo.

Las características de los grupos sanguíneos humanos se hacen patentes en el siguiente cuadro:

Grupo sanguíneo	Aglutinógenos	Aglutininas
AB	A, B	ninguna
A	A	b
B	B	a
O (cero)	ninguno	a, b

Pues bien, la herencia de los grupos sanguíneos está regida por un sistema de alelos múltiples que determinan la presencia de los aglutinógenos en los glóbulos rojos, y que son los siguientes:

- L^A , que determina el aglutinógeno A
- L^B , que determina el aglutinógeno B
- I, que no determina aglutinógeno alguno.

Cabe, por consiguiente, la existencia de los seis genotipos siguientes, que se expresan por los fenotipos que se indican:

<i>Genotipo</i>	<i>Fenotipo</i>
$L^A L^A$	Grupo A
$L^B L^B$	Grupo B
$L^A L^B$	Grupo AB
$L^A I$	Grupo A
$L^B I$	Grupo B
II	Grupo O

En este caso, los alelos L^A , L^B son dominantes y el alelo I recesivo. Pero, además, se dice que los alelos L^A , L^B son codominantes, pues ambos se expresan fenotípicamente en el caso de que se hallen ambos juntos.

ESTUDIO DE LAS MUTACIONES GENICAS

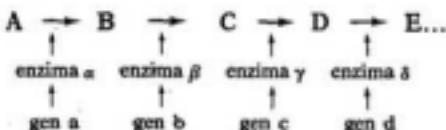
El estudio de las mutaciones génicas se ha llevado a cabo fundamentalmente en los microorganismos, y especialmente en las bacterias, ya que estos seres se reproducen tan rápidamente que en el laboratorio se pueden manejar poblaciones enormemente numerosas, con lo que se aumenta la probabilidad de poder estudiar un fenómeno más o menos raro, como es la mutación. Pero, además, hay otro hecho que hace de las bacterias unos organismos muy apropiados para el estudio de las mutaciones génicas, y es que se trata de células haploides, en las que cualquier cambio genético va seguido de una manera prácticamente inmediata de su expresión fenotípica.

En las bacterias, la expresión fenotípica de una mutación suele ser la **pérdida de una actividad bioquímica específica**. Se puede considerar a este respecto una bacteria como un mecanismo metabólico extraordinariamente complicado, que transforma unas sustancias en otras por medio de una serie de reacciones bioquímicas inducidas por las enzimas correspondientes. Estas reacciones están rigurosamente ordenadas, de manera que la sustancia producto de una reacción es el sustrato de la reacción siguiente.

Supongamos, pues, que a una población bacteriana la alimentamos con el sustrato A, que ella metabolizará por una serie de reacciones, como se muestra en el siguiente esquema:



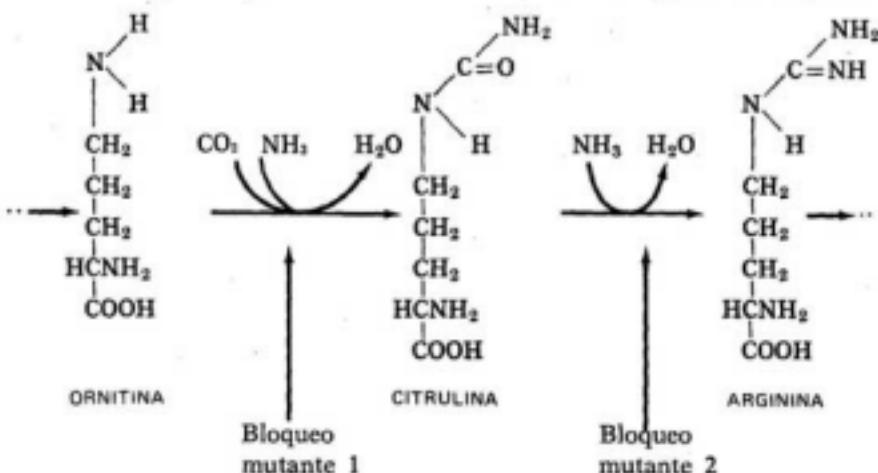
Estas reacciones están inducidas por sus correspondientes **enzimas**, que, a su vez, dependen para su formación de los genes que cifran cada una de estas enzimas. El esquema anterior se podrá completar así:



Si, a consecuencia de una mutación génica que afecte al gen b, este gen deja de inducir la síntesis de la proteína enzimática β , no se producirá ya la reacción $B \rightarrow C$ (se dice que la reacción $B \rightarrow C$ ha sido bloqueada) y la vida de la bacteria se paralizará a menos de que se le administre el producto C en el medio de cultivo y pueda proseguirse así la serie de reacciones $C \rightarrow D \rightarrow E\dots$

En el colibacilo, o bacteria habitante del intestino grueso del hombre, se han podido observar casos de este tipo de mutantes.

Así, por ejemplo, se conocen mutantes que bloquean, por mutación génica, la serie de reacciones metabólicas de aminoácidos siguiente, en las distintas reacciones que la integran:



CAUSAS DE LAS MUTACIONES GENICAS

En los seres vivos se observa con cierta frecuencia la aparición sin causa aparente de mutaciones génicas. Esta es la razón por la que se suele hablar de «mutaciones espontáneas», pero realmente con esta expresión se quiere manifestar la ignorancia que tenemos con respecto a la causa de estas mutaciones.

La frecuencia de las mutaciones espontáneas se ha cifrado en las bacterias entre una cada 100 millones de bacterias en cada generación para unas especies, y una cada diez mil bacterias para otras. En la especie humana se ha calculado que en cada millón de gametos aparecen a causa de nuevas mutaciones 28 causantes de albinismo, 30 de microcefalia y 32 de hemofilia. Evidentemente, estas anomalías no aparecen en proporciones tan elevadas, porque la mayor parte de los genes mutados son recesivos.

La frecuencia o tasa de mutación se eleva claramente cuando se someten los seres vivos a ciertos agentes físicos o químicos que se denominan **agentes mutagénicos**, algunos de los cuales se pueden considerar probablemente como causas de las mutaciones «espontáneas».

Los agentes mutagénicos de naturaleza física son principalmente las **radiaciones**, y especialmente los rayos ultravioleta y las radiaciones ionizantes.

Los agentes mutagénicos químicos son de naturaleza muy variada: entre ellos están los **peróxidos**, las **acridinas**, el **ácido nitroso**, la **hidroxilamina**, etc.

Se conocen bastante bien las maneras de actuar estos agentes mutagénicos sobre el ADN para provocar la aparición de «errores» en la duplicación semiconservadora. Así, por ejemplo, el ácido nitroso convierte a la **adenina** en **hipoxantina** y esta última se comporta al aparearse como si fuera guanina, es decir, se aparea con una citosina. De esta manera, a la siguiente duplicación, la pareja de bases A-T se habrá convertido en una pareja C-G.

Las acridinas **intercalan** unas nuevas bases en la cadena de ADN, o bien **sustraen** algunas bases de dicha cadena, con lo que la sucesión de las mismas se altera por completo y con ella su mensaje genético.

A consecuencia de la acción de estas sustancias mutagénicas (y lo mismo sucede en la mutación espontánea), las proteínas enzimáticas que están cifradas en el ADN ya no son las mismas y, por consiguiente, tampoco será el mismo el comportamiento fisiológico de la célula.

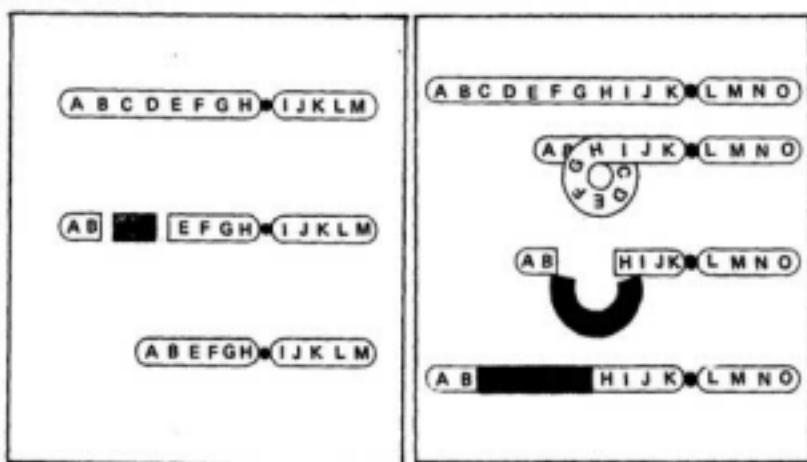
A veces el nuevo mensaje da lugar a la síntesis de una proteína no enzimática, o a la de una enzima que produce efectos indeseables en la célula, y entonces esta célula es incapaz de vivir: se dice en este caso que la mutación es **letal**.

MUTACIONES CROMOSOMICAS

Son **alteraciones de la estructura normal de los cromosomas**, con las consecuencias subsiguientes sobre los genes que radican en dichos cromosomas.

Las mutaciones cromosómicas principales son las **delecciones**, las **inversiones** y las **translocaciones**.

Con el nombre de **delección** se conoce la pérdida de un fragmento de un determinado cromosoma. Este fragmento se pierde al romperse el cromosoma correspondiente bajo la acción de una radiación penetrante (rayos X) o de una sustancia mutagénica (iperita), quedando libre un fragmento cromosómico más o menos importante. Cuando se produce la mitosis, el trozo delectado no se fija a las fibras del huso y, por tanto, no es transportado a los núcleos hijos, a consecuencia de lo cual no lo reciben tampoco las sucesivas generaciones celulares.

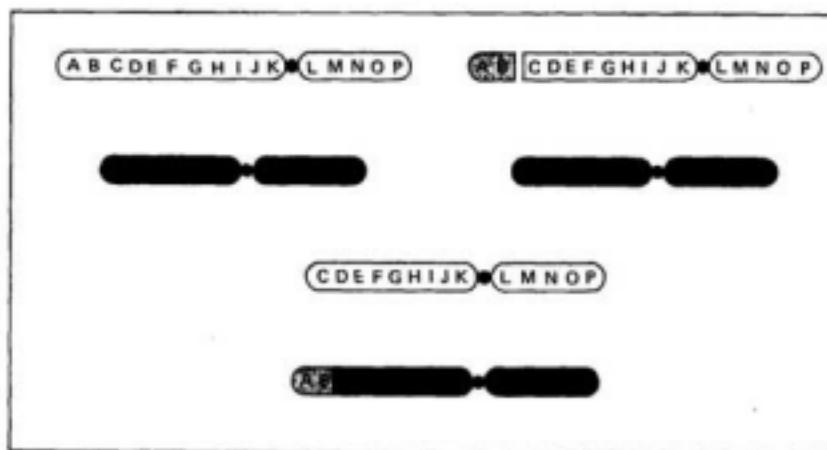


Delección. Los genes C y D desaparecen del cromosoma por pérdida de un fragmento.

Inversión. Los genes C, D, E, F, G, se colocan en el cromosoma en orden inverso.

Los genes que radican en el fragmento delectado se pierden definitivamente para la célula, de lo que se puede fácilmente deducir que si se trata de un gran número de genes o de algunos genes de gran importancia, la delección será la causa de una **mutación letal**, lo que sucede con gran frecuencia.

En otros casos, el fragmento delectado puede volverse a unir al mismo cromosoma, pero invirtiéndose sus extremos, por lo que el cromosoma que ha sufrido este proceso sigue conteniendo los mismos genes, pero en un orden distinto, con las correspondientes consecuencias en cuanto se refiere a los fenómenos del «crossing-over». Este fenómeno se denomina **Inversión**.



Translocación. Los genes A y B pasan de un cromosoma a otro.

Por último, en el caso de la **translocación** se produce también la rotura de un cromosoma, con la separación de un fragmento y su soldadura ulterior, pero aquí el fragmento se suelta a otro cromosoma distinto del de origen.

La principal consecuencia genética de la translocación es la aparición de nuevas combinaciones de genes ligados, pero además, dado que la expresión fenotípica de los genes depende en parte de su posición, la translocación (y también la inversión) puede dar origen a la aparición de algunas propiedades nuevas. De hecho, por ejemplo, se sabe que en *Drosophila* la acción de varias translocaciones ha dado origen a la aparición de algunas nuevas especies.

MUTACIONES GENOMICAS

También este tipo de mutaciones puede aparecer espontáneamente o ser provocado experimentalmente, sobre todo mediante la utilización de productos químicos que paralizan de alguna manera la mitosis, como la **colchicina** o el **hexaclorociclohexano**.

En general, los casos de mutaciones genómicas se pueden reducir a la existencia de un cromosoma de más o de menos (**aneuploidía**) o a una multiplicación del número de dotaciones cromosómicas completas (**euploidía**).

ANEUPLOIDIA

La aneuploidia tiene su origen en la falta de disyunción de una pareja de cromosomas en la meiosis.

Como se recordará, al principio de la meiosis se aparean los cromosomas homólogos, formándose unas parejas de cromosomas que se separan después, una vez realizado el intercambio de genes.

Pues bien, en algunos casos, los cromosomas apareados no se separan, y van a parar **juntos** a una sola de las células gaméticas descendientes. De esta forma, uno de los gametos carecerá del cromosoma de referencia y, en cambio, el otro lo tendrá **doblado**. Cuando se produce la fecundación, al unirse el gameto anormal con uno normal, se producirá un zigoto que en general no es viable si el gameto era portador de un cromosoma de menos; pero, en cambio, si el gameto llevaba un cromosoma supernumerario en el zigoto, este cromosoma estará **triplicado** en lugar de duplicado, lo cual tiene unas importantes consecuencias fenotípicas. La presencia de un determinado cromosoma en triple dotación se llama **trisomía**, y **tetasomía** si el cromosoma de referencia está en dotación cuádruple (lo cual es posible, aunque raro, si se fecundan mutuamente dos gametos que tengan el mismo cromosoma supernumerario).

LAS TRISOMIAS EN LA ESPECIE HUMANA

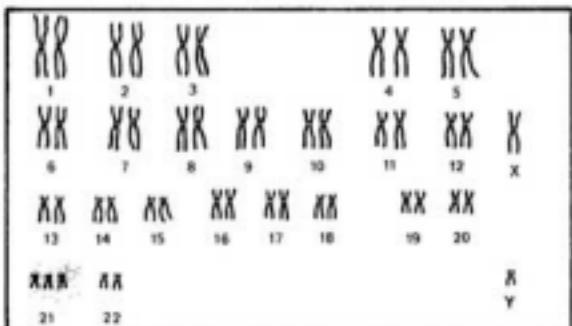
En la especie humana se han estudiado mucho los casos de cromosomas supernumerarios (o ausentes) que dan lugar a diversas malformaciones y deficiencias generales.

Hay que distinguir entre trisomías en los **autosomas** y en los **cromosomas sexuales**.

El caso más conocido entre las trisomías de los autosomas es la **trisomía del cromosoma 21**, que da origen a individuos humanos con 47 cromosomas y que presentan ciertas anomalías, como la debilidad mental y la de poseer los ojos con un pliegue especial llamado **pliegue mongólico**, lo que da nombre a estos individuos. El número de mongólicos en la especie humana es bastante frecuente, y en la raza blanca representa

del 1 al 2,5 por 100 de los nacidos de madres mayores de cuarenta años.

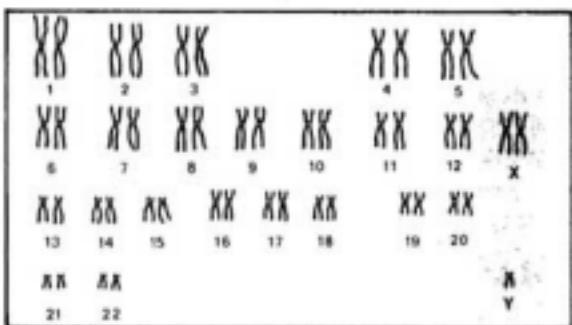
Entre las anomalías numéricas que atañen a los cromosomas sexuales humanos las más frecuentes son:



Cromosomas de un individuo mongólico.



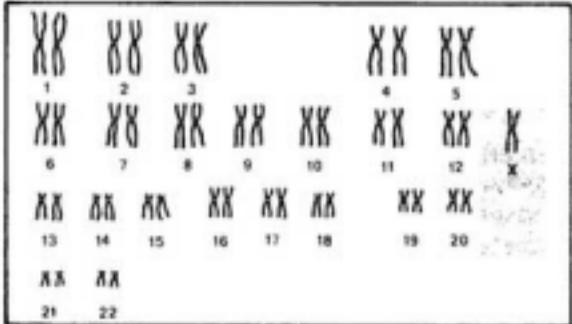
Mongólico.



Cromosomas de un individuo con síndrome de Klinefelter.



Individuo con dicho síndrome.



Cromosomas de un individuo con síndrome de Turner.



Individuo con dicho síndrome.

1. Síndrome de Klinefelter. La dotación cromosómica (**cariotipo**) de estos individuos es $44+XXY$, lo que quiere decir que tienen los 44 autosomas normales y un cromosoma sexual supernumerario. Ya que estos individuos son fenotípicamente varones (aunque deficientes) se entiende que existe un cromosoma X de más. El síndrome de Klinefelter es una anomalía relativamente frecuente, ya que los autores lo cifran entre el 0,2 por 100 y el 0,3 por 100 de los varones nacidos vivos.
2. Síndrome de Turner. Estos individuos, relativamente escasos (aproximadamente el 0,04 por 100 de las mujeres nacidas vivas), tienen un cariotipo $44+X$, es decir, con los 44 autosomas más un solo cromosoma X. Fenotípicamente los individuos afectados por el síndrome de Turner son hembras con características infantiles.
3. Polisomía X. Síndrome de frecuencia relativamente alta (0,1 por 100 de las mujeres nacidas vivas), con un cariotipo $44+XXX$, con un cromosoma X supernumerario. Fenotípicamente son hembras normales con cierto retraso mental.

EUPLOIDIA

Se dice que una célula o que un individuo es **euploide** cuando todos sus cromosomas están en igual número. Ya hemos visto que hay células **haploides** y **diploides**. Sin embargo, es frecuente en las plantas la existencia de individuos con tres o más dotaciones cromosómicas, individuos que se denominan **triploides**, **tetraploides** y, en general, **poliploides**.

Estas anomalías se originan, la mayoría de las veces, en la falta de una o de las dos divisiones meióticas, lo que origina gametos con $2n$ y $4n$ cromosomas. Si un gameto $2n$, por ejemplo, se fecunda con un gameto normal, n dará lugar a un individuo $3n$, es decir, triploide; si se fecunda con otro $2n$ como él, el resultado será un tetraploide $4n$.

Experimentalmente se pueden producir poliploidias mediante diversos tratamientos, como el calor, agentes paralizantes de la mitosis (colchicina), etc.

En las plantas, la obtención de poliploides y de sus híbridos es una de las formas más utilizadas para la mejora genética, habiéndose obtenido de esta manera razas de cereales excepcionalmente productivas.



LA INTEGRACION DE LAS FUNCIONES EN EL ORGANISMO VEGETAL

En los capítulos precedentes se han estudiado las funciones vitales sobre todo a nivel celular, ya que la célula es la primera unidad funcional biológica.

Sin embargo, en los seres pluricelulares las funciones celulares están supeditadas a la función del conjunto individual, lo que plantea al organismo pluricelular una serie de problemas que no se presentaban en la célula aislada. Efectivamente, estos organismos están formados por varias partes diferentes que llevan a cabo funciones distintas, ya que las células que las forman están diferenciadas en tejidos a su vez diferentes, y la unidad del organismo exige una coordinación entre dichas partes para una integración funcional de las mismas.

Cada organismo ha resuelto estos problemas de integración de manera diferente, por lo que resultaría una tarea casi inacabable el tratar de detallar todas las maneras posibles de llegar a una integración funcional orgánica. Sin embargo, vamos a tratar de las formas de integración de las funciones que tienen una vigencia más general, empezando en este capítulo por estudiar cómo suceden las cosas en los vegetales más complicados, las fanerógamas.

► Los vegetales tienen órganos muy variados. En estas plantas de maíz se pueden observar tallos, hojas y flores.

LA ELABORACION DEL ALIMENTO POR LAS PLANTAS VERDES

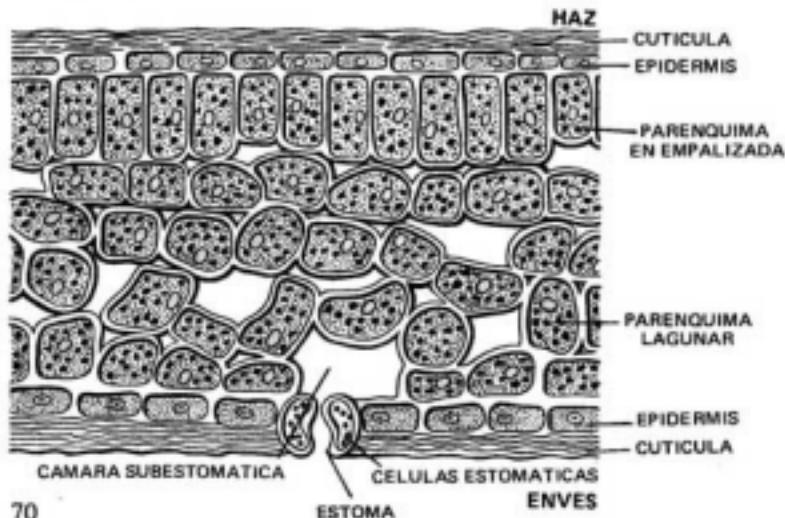
La presencia de la clorofila en las células de los tejidos asimiladores de las plantas verdes hace que estos organismos dependan exclusivamente del medio ambiente inorgánico para su subsistencia, es decir, su nutrición es **autótrofa**.

Como vimos en su momento, para que la fotosíntesis pueda realizarse es preciso que la célula clorofílica tenga a su disposición una fuente de energía luminosa, agua y dióxido de carbono. Estos tres requerimientos condicionan ciertos dispositivos anatómicos, de los que resulta la forma y estructura de la hoja, como órgano principal de la nutrición vegetal.

En primer lugar, las radiaciones luminosas, necesarias para la fotosíntesis, son poco penetrantes, por lo cual los tejidos asimiladores han de estar **al exterior** de la planta o, por lo menos, a escasa profundidad. Pero esta circunstancia condiciona a su vez que el escaso espesor de estos tejidos se componga con una **gran extensión**. Ambas condiciones se encuentran en las hojas, expansiones amplias, delgadas, formadas fundamentalmente por una delgada epidermis en sus dos caras y un parénquima clorofílico en su interior.

La hoja posee también unos adecuados dispositivos anatómicos para que el dióxido de carbono llegue con facilidad a las

Corte de una hoja.



células clorofílicas, así como para permitir la evacuación a la atmósfera del oxígeno producido en la fotosíntesis. Estos dispositivos son la presencia de amplias lagunas entre las células del parénquima del envés (parénquima lagunar) y la de multitud de orificios o **estomas** en ambas epidermis, pero sobre todo en la inferior, es decir, la que recubre a dicho parénquima lagunar. De este modo el aire circula fácilmente por el interior de la hoja, realizándose con facilidad el intercambio de gases propio de la fotosíntesis.

Por último, el agua es transportada al interior de las hojas por las últimas ramificaciones del sistema circulatorio vegetal, que constituyen en la hoja las llamadas **nerviaciones**. Este agua proporciona la materia prima para la fotolisis, la primera operación de la fotosíntesis, y al propio tiempo sirve de vehículo para el transporte de los hidratos de carbono producidos en dicha función.

LA RESPIRACION

La respiración de las células vegetales exige, como la de todas las células, un intercambio de gases con la atmósfera, inverso al que tiene lugar en la fotosíntesis, es decir, absorbiendo oxígeno y desprendiendo dióxido de carbono.

La planta efectúa sus intercambios respiratorios con el medio ambiente por **todas las partes permeables** de su superficie, raíces, tallos, hojas, flores, frutos e incluso semillas. Pero también son las **hojas**, gracias a las condiciones anatómicas más arriba aludidas, los órganos más eficaces para dichos intercambios respiratorios.

LA ABSORCION DEL AGUA Y DE LOS NUTRIENTES MINERALES

En general, las plantas necesitan grandes cantidades de agua para su sostenimiento, debido, sobre todo, a la constante emisión de vapor de agua por las hojas y, en la época del crecimiento o en la de la formación de las nuevas hojas, al enorme aumento de tamaño de las vacuolas en las células vegetales, aumento realizado a expensas de agua absorbida.

No hay que olvidar, además, que si bien la planta sintetiza todo el alimento orgánico, necesita obtener del suelo los elementos minerales necesarios para la elaboración de muchos

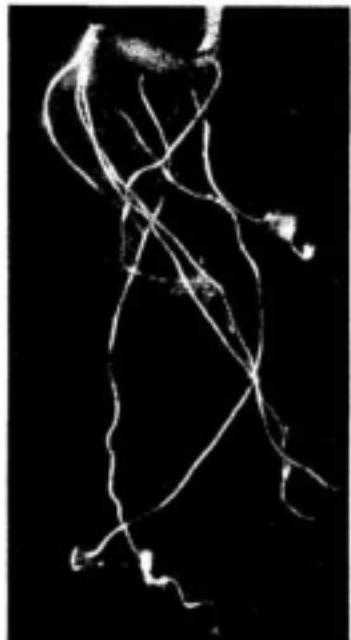
compuestos. Estos elementos se encuentran en el suelo en cantidades muy pequeñas, de manera que la planta tiene que tomar del suelo grandes cantidades de agua con sustancias minerales en disolución muy diluida, para que la cantidad de estos elementos que penetre en el vegetal sea la necesaria.

Estas circunstancias hacen necesaria la existencia de un órgano cuya principal misión sea la absorción del agua, órgano profundamente hundido en el suelo, que es la **raíz**.

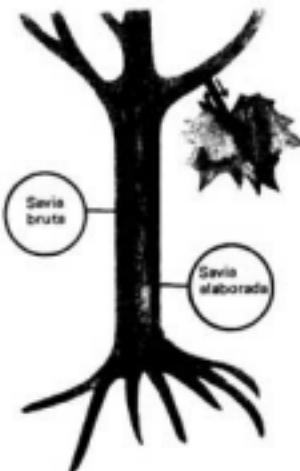
La raíz, a favor de un gran desarrollo por sus múltiples ramificaciones y gracias a la presencia de infinidad de **pelos absorbentes**, se constituye así en el órgano de la absorción del agua por excelencia y también, como en seguida se verá, como uno de los órganos circulatorios de la planta de la mayor importancia.

LA CIRCULACION DEL AGUA Y DE LOS ALIMENTOS

El agua, como acabamos de decir, se absorbe en grandes cantidades por la raíz. Por otra parte, también hemos dicho que



Pelos absorbentes en una planta joven de avena.

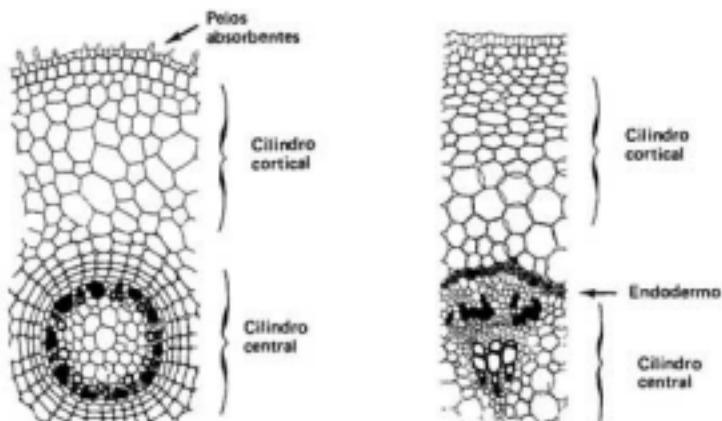


Esquema general de la circulación de la savia.

el agua se emite por las hojas en grandes cantidades, en forma de vapor de agua en la función denominada transpiración. Esto quiere decir que en la planta se establece una **corriente continua** de agua desde la raíz hasta los extremos de las hojas, corriente que es canalizada por los **vasos leñosos de la raíz** y luego por los **vasos leñosos del tallo** hasta llegar a las hojas en las que los diminutos vasos corren a lo largo de las nerviaciones.

Hay que hacer constar, sin embargo, que la corriente ascendente no está constituida solamente por agua, sino que, como hemos dicho, se trata de una disolución diluida de sales minerales a la que se aplica el nombre de **savia bruta** o **savia ascendente**.

Por otra parte, a partir de las hojas se establece paralelamente a la primera otra corriente circulatoria de una disolución acuosa más concentrada (ya que parte del agua se ha perdido por vaporización), rica en productos orgánicos solubles, principalmente en hidratos de carbono, que son las sustancias alimenticias elaboradas en los órganos foliares y puestas así a disposición de todas las células del vegetal. Esta disolución es la **savia descendente**, o **savia elaborada**, que baja por los **vasos cribosos**, primero en las nerviaciones de la hoja y después por el tallo y por la raíz.



Corte de una raíz. Vasos leñosos en rojo; vasos liberianos en verde.

Corte de un tallo. Vasos leñosos en rojo; vasos liberianos en verde.

EL ALMACENAMIENTO DE LOS PRODUCTOS DE RESERVA

En todos los seres vivos se aprecia la necesidad de almacenar alimentos cuando se producen en exceso, para ser utilizados en las épocas de escasez o de mayor consumo. En las plantas superiores, esta necesidad es tanto más evidente, ya que con frecuencia se ajustan en sus funciones vitales a un ritmo en el que se alternan la elaboración de los productos y su consumo. De ordinario, en efecto, la planta almacena durante gran parte de su vida productos alimenticios que luego utilizará en el proceso reproductor, cuando dé origen a flores y frutos.

En las plantas superiores el almacenamiento de los productos de reserva se hace, de ordinario, en el interior de las células de diferentes órganos. De hecho, por ejemplo, incluso en las mismas células de los parénquimas clorofílicos se almacena momentáneamente, inmediatamente después de su formación en los cloroplastos, la reserva hidrocarbonada más importante en los vegetales, el almidón. Sin embargo, lo cierto es que existen ciertos órganos especializados en la acumulación de las reservas alimenticias del vegetal.

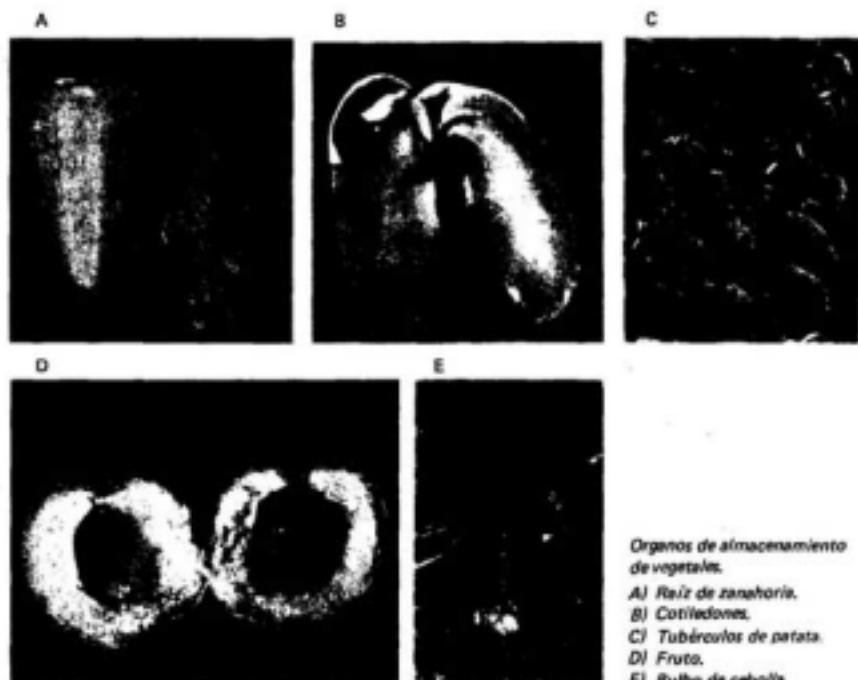
Estos órganos almacenadores están formados casi exclusivamente por unos **parénquimas incoloros**, almacenadores en sus células de los productos de reserva. En unas ocasiones son las **raíces**, que se abultan notablemente en algunas plantas, como en la zanahoria, en la que almacenan fundamentalmente almidón, o en la remolacha, en donde la reserva es de sacarosa. En otras son los **tallos**, subterráneos o aéreos, los que se cargan de sustancias de reserva, como en el caso del tubérculo de la patata; en otras, finalmente, la acumulación de las reservas se hace en las **hojas**, como ocurre en todos los bulbos, como la cebolla, el tulipán, etc.

Mención aparte merecen las **semillas** y los **frutos** como almacenadores de productos de reserva.

Como ya sabemos, la porción más importante de la semilla es la **plántula** o **embrión**, que no es más que la nueva generación de la fase diploide, ya formada en el interior de dicha semilla como una planta diminuta. Este pequeño embrión no tiene todavía clorofila, ni su raíz está dispuesta aún para la

toma de agua y de sales minerales. Por consiguiente, debe transcurrir algún tiempo durante el cual ha de vivir a expensas de los materiales de reserva almacenados en la semilla, ya sea en el **albumen**, tejido especial de la semilla destinado exclusivamente a la nutrición del embrión, ya sea en los **cotiledones** o primeras hojas del embrión mismo. Tanto en el albumen como en los cotiledones se almacenan, según las plantas, almidón, otros hidratos de carbono, aceites o incluso materiales de reserva albuminoideos, como la llamada aleurona.

En el fruto, por el contrario, el almacenamiento de sustancias de reserva tiene otra significación fisiológica, relacionada de ordinario con la **diseminación de las semillas**. En muchos casos, en efecto, la presencia de productos alimenticios y de agradable sabor en el fruto hace que los animales los consuman y transporten, esparciendo las semillas en una zona más o menos amplia.



Organos de almacenamiento de vegetales.

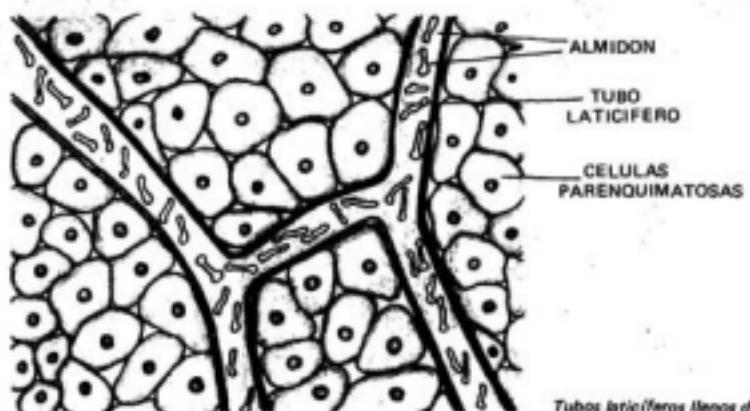
- A) Raíz de zanahoria.
- B) Cotiledones.
- C) Tubérculos de patata.
- D) Fruto.
- E) Bulbo de cebolla.

LA SECRECION Y LA EXCRECION EN LOS VEGETALES

A consecuencia del metabolismo de los órganos, aparecen unos productos característicos de su actividad. En los animales se dice que hay **secreción** cuando los productos formados juegan un papel en la fisiología del organismo, como la saliva frente a la digestión del almidón, y **excreción** cuando los productos que aparecen son inútiles y aun tóxicos y han de ser expulsados del organismo, como la urea por la orina.

En los vegetales, la **excreción** entendida de esta manera es relativamente rara; por otra parte hay muchas materias que se encuentran en abundancia en los tejidos vegetales a las que no se puede atribuir un papel concreto, por lo que parece que estas sustancias inservibles quedan depositadas sin fin ulterior en el seno de los tejidos y de los órganos. Entre estas sustancias de excreción están los **aceites esenciales**, **taninos**, **alcaloides**, etc., que se suelen acumular en las zonas exteriores de los órganos, como en las bolsas secretoras de la piel de naranjas y limones, en los conductos resiníferos de las coníferas, etc.

De todas maneras, se puede hablar, por lo menos en algunas plantas, de un tejido fundamentalmente almacenador de productos de excreción, como los **tubos laticíferos** de muchos órganos de ciertas plantas, los cuales contienen un líquido, el **látex**, rico en caucho, que es una mezcla de hidrocarburos.



Tubos laticíferos llenos de látex.

La secreción en los vegetales, entendida como en los animales, es también un fenómeno raro. En algunos casos hay una auténtica secreción de un jugo digestivo, como en el caso de la planta carnívora atrapamoscas, que elimina por sus hojas una **enzima proteolítica** con la que digerirá a sus víctimas, pero en la mayor parte de los casos se confunde la secreción con la excreción, como sucede en las plantas que segregan una cera a través de su epidermis; la cera es un producto útil para la planta, ya que impide la evaporación a través de la delgada pared celular de las células epidérmicas, por lo que se puede considerar como un producto de **secreción**; sin embargo, también puede tratarse de una sustancia inserrible que se elimina al exterior de la planta, y en este caso sería un producto de **excreción**.

Por último, podemos considerar también como un fenómeno de secreción la eliminación por las raíces de diversos **ácidos** que solubilizan algunos minerales del suelo, haciéndolos más asequibles a la absorción radicular.

FUNCIONES ESQUELETICAS Y DE PROTECCION

Aparte de que la función **esquelética** en los vegetales la cumplen todas las células, ya que todas tienen una pared celular rígida, en los vegetales superiores esta función está sobre todo confiada a la **raíz** y al **tallo**.

La raíz, gracias a las fibras y vasos que posee, pero gracias, especialmente, a su **abundante ramificación**, es un importante elemento esquelético del vegetal, ya que un buen y abundante aparato radicular determina un perfecto anclaje en el suelo y es, en definitiva, una defensa contra la deformación, que es la misión de todas las estructuras biológicas esqueléticas. En cuanto al tallo, especialmente si se trata de un tronco, es de una rigidez y solidez excepcionales, cualidades que le confieren los **tejidos conductores leñosos** y los **de sostén** de que está abundantemente dotado.

Por último, la protección contra las injurias del medio ambiente se extiende en los vegetales, como es lógico, a **toda su superficie**, pero no se realiza en todos los órganos de la misma manera.

A



B



Estructuras protectoras.
A) *Corteza de un árbol.*
B) *Espinas de cactáceo.*

En las hojas y tallos jóvenes basta una **epidermis** de una sola capa de células vivas para conferir la necesaria protección, sobre todo si está dotada de **pelos** que impidan parcialmente la evaporación del agua de los tejidos asimiladores subyacentes. Esta ligera protección hace posible que pase a su través la luz y pueda realizarse la fotosíntesis en dichos tejidos.

Por el contrario, en los órganos que no reciben luz alguna, como las raíces, o que no tienen necesidad de ella por no poseer tejidos clorofílicos, como los tallos añosos, aparece una protección mucho más eficaz en forma de **capas de tejido suberoso**, más o menos abundante.

Digamos, además, que en muchas plantas existen mecanismos defensivos muy variados, como **espinas**, etc.

EL MOVIMIENTO DE LOS VEGETALES SUPERIORES

A pesar del aparente estatismo de los vegetales, que incluso se ha tomado como criterio para distinguir las plantas de los animales, en los vegetales se pueden apreciar unos movimientos que se realizan siempre como respuesta a unos determinados **estímulos** físico-químicos procedentes del medio ambiente.

En los vegetales superiores se aprecian movimientos de características muy diferentes. Unos son los **tactismos**, movimientos de órganos (o de organismos completos, como sucede en las plantas inferiores), cuyas partes se desplazan bajo la influencia de un determinado factor. Los otros son los **tropismos**, que son movimientos aparentes de órganos en vías de crecimiento, que orientan éste en relación con la dirección según la cual se ejerce la fuerza determinante.

En los vegetales superiores, los tactismos suelen suceder a nivel celular. Así, por ejemplo, los cloroplastos de las células clorofílicas de algunas plantas se desplazan en el seno del citoplasma, para orientar el conjunto según la dirección y la intensidad de los rayos solares (**fototactismo**); los anterozoides de los helechos se dirigen nadando hacia el arquegonio, atraídos por el ácido malico producido por aquél (**quimiotactismo**), etc.

Más fácilmente observables son los tactismos llamados específicamente **nastias**, en la que los movimientos corren a cargo de órganos que modifican su postura en el mismo sentido, sea cual fuere la naturaleza y la orientación del estímulo. Uno de los ejemplos más notables de este fenómeno es el movimiento de la hoja de la sensitiva, que pliega sus foliolos cuando se la golpea, plegando mayor o menor número de foliolos, según la intensidad del estímulo. La sensitiva y muchas otras plantas (trébol, por ejemplo) realizan, bajo la influencia de la luz, los denominados **movimientos nictitrópicos**, que consisten en plegar los foliolos de sus hojas en la oscuridad y desplegarlos a la luz.



Rama de mimosa en posición de "velo" (izquierda) y en posición de "suelto", (derecha)



Fototropismo. Las plántulas de habas sembradas en la mecería de la figura, crecen en dirección a la fuente de luz.



Geotropismo. Se ha colocado un pesante peso sobre la raíz hacia arriba y el tallo hacia abajo. Al cabo de unas horas, la respuesta a la acción de la gravedad ha sido la inclinación de ambos órganos en sentido opuesto.

En cuanto a los **tropismos**, los más conocidos son los que tienen su origen en la acción de la gravedad (**geotropismos**) y los que se realizan en relación con la luz (**fototropismos**).

La dirección y sentido que toman el tallo y la raíz cuando están creciendo están determinados por la acción de la gravedad. Varios experimentos, sencillos de realizar, así lo demuestran. Si se coloca una semilla en germinación en tal posición que el tallo y la raíz estén horizontalmente situados, al cabo de algún tiempo se verá que la raíz dirige su punta hacia abajo y el tallo la suya hacia arriba. Se dice que la raíz tiene **geotropismo positivo** y que el tallo tiene **geotropismo negativo**. Pero si hemos tenido la precaución de marcar en los referidos órganos unas señales al comenzar el experimento, veremos que la raíz y el tallo no se han curvado, sino que han **seguido creciendo y han rectificado la dirección del crecimiento** en relación con la referida acción de la gravedad.

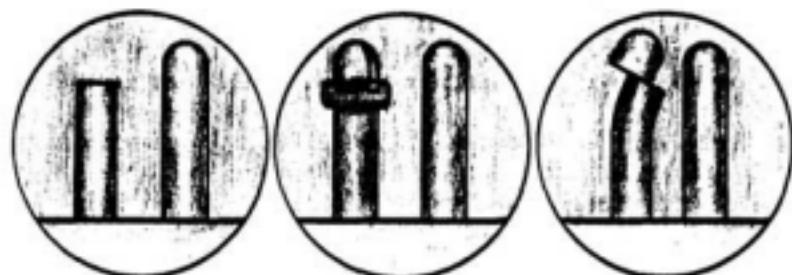
De la misma manera podemos observar que un tallo en crecimiento se dobla en dirección a la luz, mientras que una raíz lo hace en sentido opuesto: el tallo tiene **fototropismo positivo** y la raíz **fototropismo negativo**. En este caso, tampoco se trata de un movimiento del tallo en dirección a la luz, sino de una **orientación del crecimiento** en dicho sentido.

HORMONAS VEGETALES

Con respecto a este último fenómeno, se conocen bastante bien sus causas, que dieron información por primera vez de la existencia de unas sustancias químicas en los vegetales que tienen una acción sobre algunos puntos de la planta, de manera que producen un resultado de interés general para la vida del vegetal. Estos productos se han denominado, a semejanza con las sustancias análogas de los animales, **hormonas**.

Las experiencias se realizaron sobre el **coleóptilo** de la avena, que es el tallito que sale del grano recién germinado.

El coleóptilo de la avena, en condiciones normales, crece verticalmente. Si se corta el ápice del coleóptilo, este órgano



1

2

3

Experimento para demostrar la acción de la auxina.

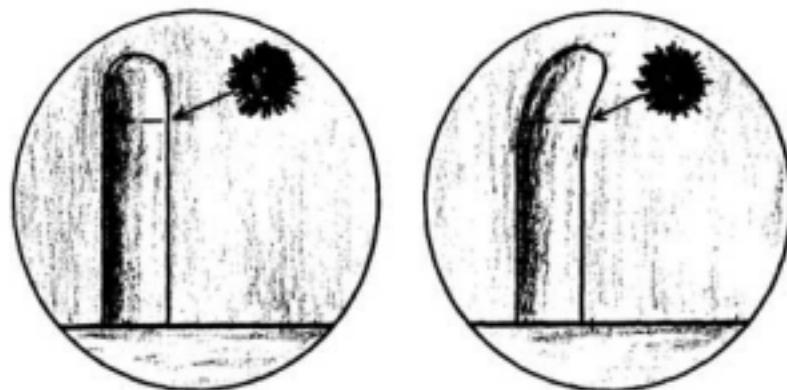
1. Cortando al ápice del coleóptilo, la plántula deja de crecer.
2. Intercalando entre el ápice cortado y el resto una pláquita de agar, se restaura el crecimiento.
3. Colocando el ápice del coleóptilo sobre la mitad del corte, solamente crece la mitad que está bajo él; el coleóptilo se dobla hacia la parte opuesta.

detiene su crecimiento, lo que indica que en él reside una sustancia que, difundida a las zonas inferiores, estimula el crecimiento. Esta suposición se confirma interponiendo entre el extremo cortado del coleóptilo y la superficie de corte una capa de una sustancia permeable (una pláquita de agar), con lo cual la sustancia puede difundirse a través del agar y se reanuda el crecimiento. Si la punta cortada del coleóptilo se hace descansar ahora sobre un lado de la superficie cortada, la hormona se difunde solamente por este lado y el tallito crece más por este lado que por el otro, doblándose.

Esto quiere decir que, en el fenómeno del fototropismo, lo que se produce es un **crecimiento diferencial**, creciendo menos la parte expuesta a la luz que la opuesta, con lo que el tallo se inclina hacia la luz.

Se ha podido aislar la sustancia hormonal responsable, a la que se ha llamado auxina, y se ha demostrado que la **luz inhibe la formación de esta sustancia**. Por consiguiente, en un tallito iluminado lateralmente solamente se formará auxina en la zona sombreada, la cual crecerá más que la parte opuesta, por lo que el tallo resultará encorvado hacia la luz.

Aunque la auxina es la hormona vegetal mejor conocida, se sabe que en los vegetales hay otras sustancias hormonales que producen unos efectos específicos en el crecimiento de



Interpretación del fototropismo en función de la auxina. La luz inhibe la síntesis de la auxina, de modo que sólo crece la parte no iluminada, en donde se sigue formando dicha sustancia. En consecuencia, se dobla el tallo hacia la luz.

diversos órganos, como la **hormona de la floración**, responsable de la aparición de las flores, y la **hormona rizógena**, a la que se debe la aparición de nuevas raíces.



LA INTEGRACION DE LAS FUNCIONES EN EL ORGANISMO ANIMAL: EL MOVIMIENTO

En el organismo animal se realizan numerosas funciones que tienen una gran complejidad. Algunas de ellas son más sencillas y más evidentes, como la respiración, la nutrición, la excreción, etc., pero otras son más complicadas y requieren un mayor desarrollo de las facultades del organismo. La actividad motriz es una de las más complejas y requiere una gran cantidad de energía. El movimiento es una función que permite al organismo adaptarse a su entorno y realizar sus actividades de forma más eficiente. El movimiento es una función que requiere una gran cantidad de energía y que implica la coordinación de numerosos sistemas y órganos.

En las páginas siguientes consideraremos los modos por los cuales se han resuelto los problemas funcionales en los organismos animales.

En este caso, y dada la inmensa variedad del mundo animal, las estructuras anatómicas y los esquemas funcionales son mucho más numerosos que en los vegetales, por cuya razón nos limitaremos, como en el caso anterior, a estudiar solamente los problemas de índole general que se plantean a los animales como unidades funcionales constituidas por órganos y aparatos. En primer lugar, el animal difiere del vegetal en su tipo de nutrición, que le obliga a movilizarse en busca de los productos alimenticios orgánicos que precisa. Por esta razón estudiaremos en primer lugar el movimiento, atributo de todos los animales, aun de los que parecen inmóviles.

◀ *El movimiento es una de las características más aparentes de los animales.*

ESTRUCTURAS ESQUELETICAS

El organismo animal no sintetiza su propio alimento, como los vegetales. Esta circunstancia le obliga a efectuar movimientos para la captura del alimento, los cuales solamente son posibles por medio de unas piezas fijas y unas piezas móviles. Al conjunto de piezas fijas, de ordinario rígidas, se le denomina **esqueleto**. El esqueleto da **solidez** y **rígidez** al cuerpo, sirve de apoyo a los músculos u órganos móviles del animal y en muchas ocasiones confiere **protección** al organismo contra roces, choques o agresiones de otros animales.

Solamente carecen de esqueleto algunos animales, como las lombrices de tierra o los gusanos parásitos en general. Estos animales viven más o menos protegidos en medios en donde están poco expuestos a accidentes, pero fundamentalmente la razón de que les sea posible vivir sin unas estructuras esqueléticas radica en su **reducido tamaño**. En cuanto el organismo animal alcanza un tamaño determinado, el cuerpo se aplastaría por su propio peso, haciéndose imposible la vida. Como el peso de un animal sumergido en el agua es relativamente menor que en tierra, es fácil comprender que existen animales sin esqueleto de un tamaño mayor en el mar que en la tierra, como, por ejemplo, algunas medusas.

En general, las estructuras esqueléticas pueden estar al exterior del animal o radicar en el interior del cuerpo: se llaman, respectivamente, **exoesqueletos** y **endoesqueletos**.

EXOESQUELETOS

Existen muchos tipos de animales con exoesqueletos. Los **músculos** tienen un exoesqueleto, la **concha**, compuesto principalmente de carbonato cálcico, que les sirve casi exclusivamente para su protección. Los **equinodermos** tienen un exoesqueleto discontinuo, formado por **placas** independientes, articuladas. En algunos de ellos, como en los **erizos de mar**, las placas se articulan firmemente y forman un caparazón continuo, en cuyo interior se contienen los órganos blandos, por lo cual es un elemento esencialmente defensivo, cuya función protectora se completa con la presencia de unas **píñulas**.



Exoesqueleto duro y compacto del cangrejo de mar.

Exoesqueleto armado de espinas de los erizos de mar.

en forma de afiladas espinas. En otros equinodermos, como en las **estrellas de mar**, las placas esqueléticas, móviles, dan inserción a unos músculos a cargo de los cuales se verifican los movimientos de los brazos.

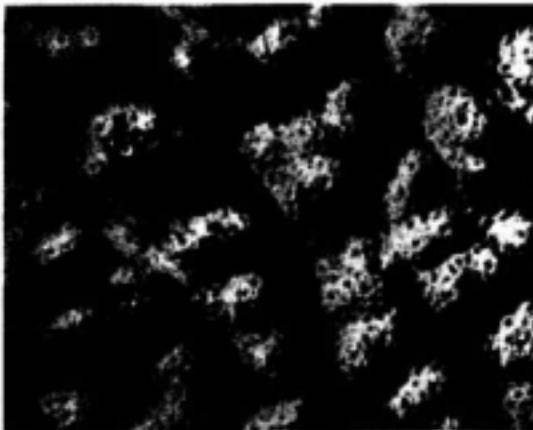
El más notable de los exoesqueletos es el que poseen los **artrópodos**, compuesto de una serie de **anillos** independientes, articulados, que cubren completamente el cuerpo del animal.

Estos anillos o **artejos**, están constituidos fundamentalmente de **quitina**, polisacárido nitrogenado, que les confiere una rigidez característica, no exenta de una cierta flexibilidad. En algunos artrópodos marinos (cigala, langosta) la quitina se enriquece con carbonato cálcico, confiriendo al esqueleto una gran dureza. El esqueleto de los artrópodos es inextensible, por lo que periódicamente el animal se despoja de su exoesqueleto para aumentar de tamaño.

La presencia de un exoesqueleto rígido en los artrópodos no impide en algunos de estos animales, como la mayor parte de los insectos, una extraordinaria movilidad, ya que en el interior del cuerpo hay una gran cantidad de músculos que se insertan en la parte interna del exoesqueleto, tomando allí apoyo para el movimiento de los artejos.



Espículas de una esponja.



Esqueleto calizo de una mediterránea.

ENDOESQUELETOS

Los **endoesqueletos** son característicos de muchos animales.

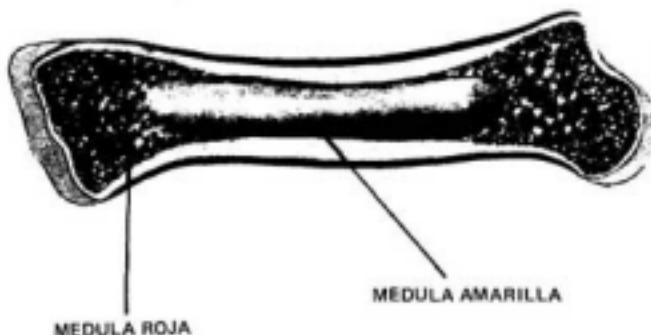
En algunos casos, como en las **esponjas**, el endoesqueleto es difuso, esparcido por todo el cuerpo en forma de unas piezas sueltas, las **espícululas**, la mayor parte de las veces fuertemente mineralizadas.

En el caso de los **celentéreos** que tienen esqueleto (la mayoría de los pólipos), éste es realmente un exoesqueleto, ya que está segregado por las células del exterior del cuerpo, pero el pólipo se adapta de tal manera a dicho esqueleto que funcionalmente se puede considerar como un **endoesqueleto continuo**, compuesto fundamentalmente de carbonato cálcico y que sirve exclusivamente de apoyo al cuerpo.

El tipo de endoesqueleto más perfeccionado es el de los vertebrados, que consideraremos más en detalle.

EL ESQUELETO DE LOS VERTEBRADOS

Las piezas que componen el esqueleto de los vertebrados son los **huesos**. El hueso no es un órgano sencillo, pues está constituido por varias partes y tejidos distintos y asume también distintas funciones.



Esquema de un hueso largo de mamífero, cortado para ver la médula roja y la médula amarilla.

Un hueso largo, como ejemplo más significativo, está formado por dos cabezas o **epífisis** y una **diáfisis** o caña del hueso. Las epífisis están formadas por una trama de **tejido óseo esponjoso**, en cuyos intersticios radica la **médula roja**, tejido hematopoyético, es decir, formador de sangre, en donde abundan los **eritroblastos**, células nucleadas que cargándose de hemoglobina y perdiendo el núcleo se convertirán en glóbulos rojos. La diáfisis está formada por **tejido óseo compacto** y tiene la forma de un cilindro hueco, en cuya cavidad se aloja la **médula amarilla**, rica en células adiposas y cuyos elementos más característicos son los **osteoclastos**, células que constantemente corroen por el interior el tejido óseo de la diáfisis para aumentar así el diámetro de la oquedad.

Sobre las dos epífisis, y en la parte en que entran en relación con otro hueso en la articulación correspondiente, existen sendas capas de **tejido cartilaginoso hialino**, que las protegen de un posible desgaste por el rozamiento.

Alrededor de todo el hueso existe una capa conjuntiva muy fina, estrechamente adherida al tejido óseo (o al tejido cartilaginoso de revestimiento, en las epífisis); esta capa se llama **periostio**. El periostio tiene la misión de formar por aposición nuevas capas de tejido óseo, de manera que el hueso aumenta paulatinamente de diámetro. Gracias a la acción conjunta del periostio y de los osteoclastos, el aumento del diámetro ex-

terior del hueso va acompañado del aumento del diámetro interior, de manera que el hueso, a pesar de crecer en grosor, no aumenta sensiblemente de peso.

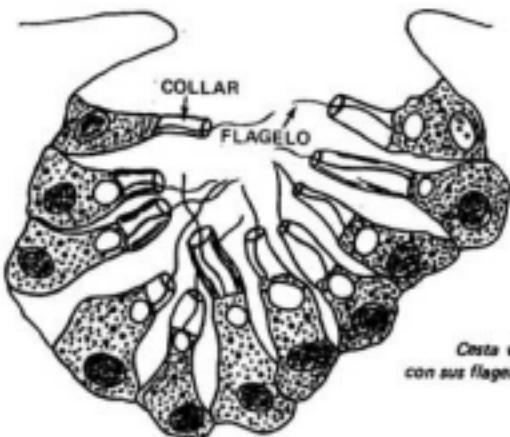
En los puntos en que los tendones se insertan en el hueso, el periostio se continúa insensiblemente con las fibras del tendón, de manera que la unión entre ambos órganos es muy sólida.

Por último, hay que añadir que cuando el hueso es joven, en la unión de la diáfisis con cada una de las epífisis existe un cartílago que está constantemente aumentando de longitud y osificándose por sus dos extremos. La existencia de estos denominados **cartílagos de conjunción** permite el crecimiento del hueso en longitud.

En el hueso podemos, pues, hallar un buen ejemplo de órgano complejo en el que se cumplen varias funciones. Por su rigidez y tenacidad, que se deben a las sales calizas de su tejido óseo, así como por su participación en las articulaciones vecinas y por su inserción en él de tendones musculares, es un **órgano de sustentación**, que pertenece, junto con los músculos, al aparato locomotor; por su participación en la formación de glóbulos rojos, un **órgano hematopoyético**; por último, podríamos decir que dado el elevado contenido en grasa de su médula amarilla, es también un **órgano en donde se almacenan materiales de reserva**.

LOS ORGANOS ACTIVOS DEL MOVIMIENTO

En los animales pluricelulares más sencillos, como en las esponjas, el movimiento es todavía en su mayor parte **celular**; es sabido que estos animales fijos capturan su alimento haciendo pasar una corriente de agua a través de su cuerpo y se alimentan de las partículas que lleva en suspensión dicha corriente. Pues bien, la corriente de agua está determinada por la acción de los flagelos de las células llamadas coanocitos, que vibran constantemente, provocando así el movimiento del agua. Sin embargo, las esponjas pueden hacer más o menos caudalosa la corriente que les atraviesa, ensanchando los poros por donde ésta penetra; esto lo consiguen mediante la contracción de las células epiteliales, pero de este movimiento se sabe muy poco todavía.



Cesta vibrátil en una esponja. Los coenocitos, con sus flagelos, determinan el movimiento del agua.

En los demás animales pluricelulares, el movimiento está siempre a cargo de los tejidos musculares, especializados en la función contráctil.

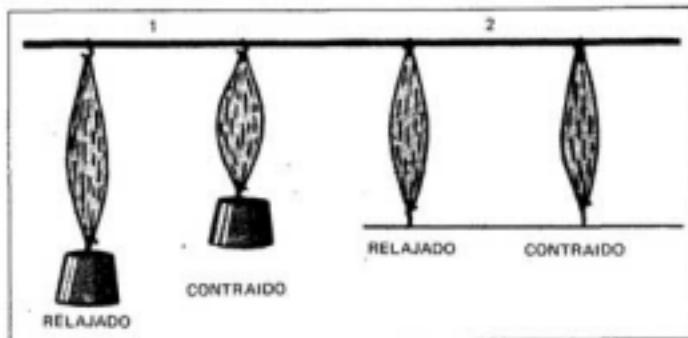
LA CONTRACCION MUSCULAR

Se conocen dos formas fundamentales de contraerse los músculos, la **contracción tónica** y la **contracción tetánica**.

La contracción tónica es la propia del tejido muscular liso. En este tipo de músculos, una vez contraídos no hay gasto de energía, de manera que es una forma apropiada para mantener durante mucho tiempo la duración de la contracción; en algunos casos, el músculo tónico contraído adopta una notable rigidez, como sucede en el músculo abductor de las valvas de los moluscos bivalvos (almejas, ostras). La contracción del músculo liso es lenta y sostenida.

Por el contrario, la contracción tetánica, propia de los músculos **estriados**, es muy rápida, y no se puede sostener más que mediante un aporte constante de energía.

Se conoce bastante bien el mecanismo de la contracción muscular tetánica, que se ha estudiado en los músculos estriados de los insectos y en los de los vertebrados. A continuación se expondrá con algún detalle la contracción del músculo esquelético de los vertebrados.



- 1. Contracción isotónica. El músculo, al contraerse, se acorta y engruesa, realizando un trabajo eficaz.*
- 2. Contracción isométrica. El músculo, al contraerse, no cambia de longitud ni de espesor; solamente se endurece.*

REGISTRO DE LA CONTRACCION MUSCULAR

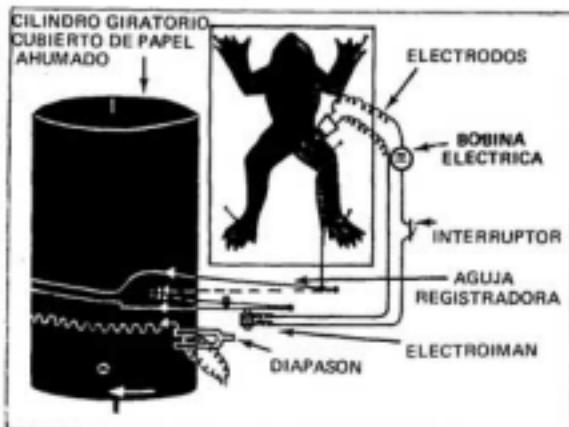
Existen dos maneras de hacerse patente la contracción de un músculo esquelético de un vertebrado. Si cuando el músculo entra en contracción los dos puntos en que se inserta por sus extremos se aproximan, el músculo se acorta, su vientre se hace más grueso y se dice que la contracción es **isotónica**.

Si, por el contrario, el músculo está inserto entre dos puntos fijos, al producirse la contracción el músculo no cambia de forma, pero se endurece: se dice que en este caso la contracción es **isométrica**.

Para el estudio fisiológico de la contracción, es más fácil colocar un músculo en forma tal que se produzca una contracción **isotónica**, es decir, un acortamiento del músculo.

Para esto se suele utilizar el músculo gastrocnemio de la rana, que se separa de la pata del animal y se fija por uno de sus extremos. El otro extremo se une a una palanca que se moverá en la contracción y que registrará la intensidad y duración de la contracción en un tambor que se mueve a velocidad constante.

Dispuesto así el aparato, se estimulará el músculo con una corriente eléctrica continua. Podremos hacer las siguientes observaciones:



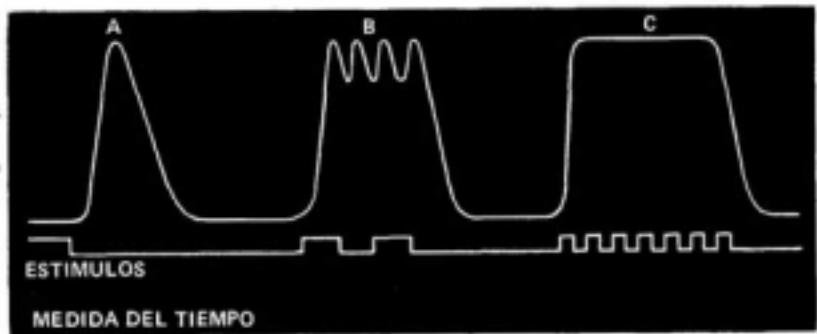
Experimento para estudiar la contracción del músculo gastrocnemio de la rana. Al cerrar el circuito, se estimula el músculo y al mismo tiempo se registra el momento del estímulo con el electroimán. El diapason, al vibrar, nos da la medida del tiempo.

- El músculo no se estimula por el paso de la corriente, sino al abrir o cerrar el circuito. El estímulo es, pues, **instantáneo**.
- El músculo no se contrae en el mismo momento de la excitación, sino que pasa un cierto tiempo entre el estímulo y la contracción; éste se llama **tiempo de latencia**.
- Una vez que se ha producido la contracción, el músculo **vuelve a relajarse**, siendo la relajación algo más lenta que la contracción. Esto significa que a cada estimulación corresponde **una sola contracción**.

Repitamos el experimento; pero esta vez antes de que el músculo se relaje por completo, apliquemos nuevamente el estímulo. Observaremos que el músculo vuelve a contraerse, apareciendo en la gráfica una curva con dos puntas, correspondientes a las dos contracciones.

Si ahora, con ayuda de una bobina de inducción provista de un vibrador, abrimos y cerramos tan rápidamente el circuito que los estímulos se sucedan a razón de 20 por segundo, se producirá una serie de contracciones en las cuales apenas iniciada la relajación se produce la nueva contracción, de manera que la gráfica parecerá una meseta erizada de dientes de sierra.

Si aumentamos la frecuencia de los estímulos, hasta 50 por segundo, el músculo no se relaja en absoluto después de cada



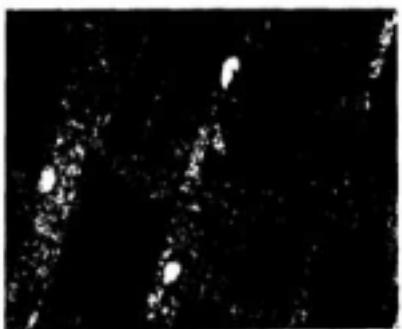
A) Contracción aislada.
B) Tétanos imperfecto.
C) Tétanos perfecto.

contracción y la gráfica es la de una meseta con la parte superior lisa.

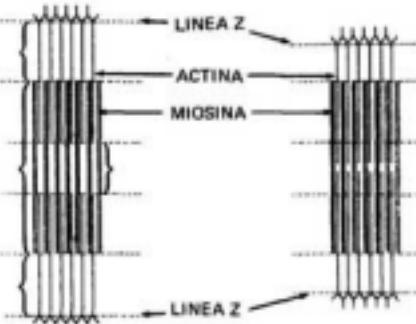
Este tipo de contracción permanente de un músculo debida a una serie de estímulos repetidos se llama tetánica; en el caso de que los estímulos sean relativamente espaciados, se produce un **tétanos imperfecto** y en el caso de que los estímulos sean lo suficientemente seguidos, un **tétanos perfecto**.

El significado de estos experimentos es el siguiente. La estimulación del músculo, que nosotros hemos hecho con la corriente eléctrica, se produce en el organismo por medio del sistema nervioso, pero tiene unas características muy parecidas. También el estímulo es instantáneo y también el músculo responde con una sola contracción a cada estímulo nervioso. Pero el sistema nervioso no envía estímulos aislados a los músculos, sino **trenes de estímulos** que hacen que toda contracción fisiológica de un músculo sea una contracción tetánica. El estímulo nervioso normal es de 25 a 30 excitaciones por segundo en el caso de la rana, y de 40 en el hombre; ambas frecuencias son suficientes para provocar un tétanos perfecto en la contracción de los músculos del cuerpo. En algunas enfermedades nerviosas, la frecuencia de los estímulos desciende por debajo de la necesaria para provocar una contracción tetánica perfecta y se producen tétanos imperfectos, que se traducen en movimientos temblorosos.

Si en vez de aplicar una corriente **continua** hubiéramos aplicado una corriente **alterna** de 50 ciclos por segundo, se habría producido siempre una contracción tetánica perfecta. En



Microfotografía electrónica de un músculo estriado.



Esquema del mecanismo de contracción de un sarcómero.

actina se desplazan libremente a lo largo de los de miosina y sobreviene la relajación.

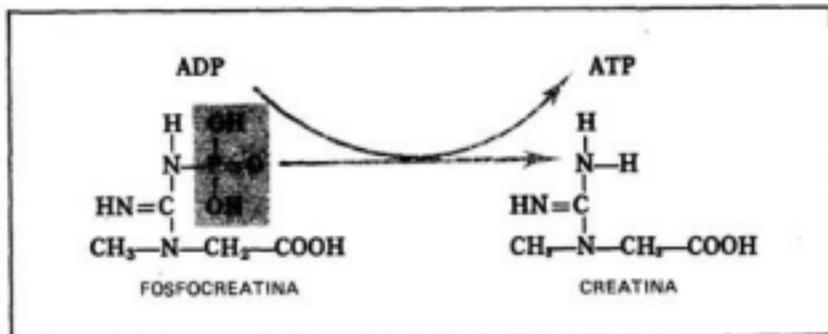
Es, pues, la presencia de iones Ca^{2+} en una concentración suficiente (pues, como veremos, siempre hay suficiente ATP), la principal causa desencadenante de la contracción muscular. Precisamente para regular esa concentración de iones Ca^{2+} , funciona un mecanismo llamado **bomba de calcio**, que bombea el calcio desde la miofibrilla al retículo endoplasmático, que en este tejido tiene un gran desarrollo. En el momento de llegar al músculo un estímulo, el calcio es bombeado **hacia las miofibrillas**, aumenta en éstas la concentración de Ca^{2+} y el ATP determina la formación de la actomiosina. Cuando cesa el estímulo, el calcio es bombeado **hacia el retículo endoplasmático**, donde queda en depósito hasta una nueva excitación; entonces se desintegra la actomiosina y quedan libres las fibrillas de actina y de miosina, produciéndose la relajación.

El consumo de ATP en la formación del complejo actina-miosina consiste en la **hidrólisis** de éste, que cede una molécula de fosfato (y la energía correspondiente a un enlace de alta energía), convirtiéndose en ADP. Como el consumo de energía en este tejido es muy grande, existen varios **mechanismos regeneradores de ATP**, para que nunca falte este compuesto en las miofibrillas.

El mecanismo regenerador de ATP más sencillo es la actividad de la enzima **mlocinasa**, que convierte a dos moléculas de ADP en una de ATP y otra de AMP:



Otro mecanismo regenerador de ATP, que procura rápidamente nuevas cantidades de este producto, está catalizado por la enzima **creatina cinasa** y utiliza para la síntesis de ATP el compuesto llamado **fosfocreatina** (en los insectos este mecanismo utiliza la **fosfoarginina**), reserva de fosfato de alta energía que se encuentra en gran cantidad en el músculo. La reacción catalizada por la creatina cinasa consiste en el paso de fosfocreatina a creatina, transfiriéndose a una molécula de ADP un fosfato de alta energía para formar una molécula de ATP:



A la larga, el ATP gastado en la contracción muscular procede de la **glucólisis**, bien porque el fosfato de la fosfocreatina procede del ATP formado en aquella vía degradativa de la glucosa, bien porque en la contracción se utilice directamente el ATP de la glucólisis.

En efecto, el **glucógeno** que abunda en el músculo se degrada en moléculas de **glucosa**, las cuales, siguiendo la vía de la glucólisis, se convierten en **ácido pirúvico**. Si el músculo está abundantemente oxigenado (lo que equivale a decir, normalmente, si la sangre aporta la cantidad necesaria de oxígeno), el pirúvico se consume en el **ciclo de Krebs**, dando el ATP correspondiente. Si, por el contrario, el músculo no tiene a su disposición oxígeno suficiente, el pirúvico se degrada por una vía anaerobia, la vía de la **fermentación láctica**, de la cual obtiene también la energía en forma de ATP necesaria para la contracción. En este último caso, sin embargo, y aparte del menor rendimiento energético de la reacción anaerobia, el ácido láctico acumulado en el músculo perturba la contracción y aparecen los fenómenos de **fatiga muscular**.



LA NUTRICION EN LOS ANIMALES

El gran problema del mundo animal, del cual dimanan todas sus características, es la nutrición. El hecho de ser incapaces de sintetizar sus propios alimentos, y la necesidad de tomarlos ya elaborados del medio ambiente, les obliga a vivir, directa o indirectamente, a expensas de los vegetales.

Como ya hemos visto, esta circunstancia obliga a los animales a la captura del alimento, es decir, a moverse de alguna manera para ponerlo a su alcance, con un considerable desarrollo de un aparato locomotor y, como veremos, también de un sistema de coordinación funcional muy complejo.

Pero, además, los alimentos orgánicos asequibles a los animales están de ordinario formados por unas moléculas complicadas, que no pueden ser utilizadas por las células tal y como se encuentran.

Es necesario degradar estas grandes moléculas al estado de moléculas más sencillas que puedan ya incorporarse a la dinámica del metabolismo celular, y esto implica una serie de operaciones que requieren la dedicación de gran parte de las actividades fisiológicas de los animales, operaciones que, en conjunto, reciben el nombre de digestión.

◀ Los animales se alimentan a expensas de sustancias orgánicas.

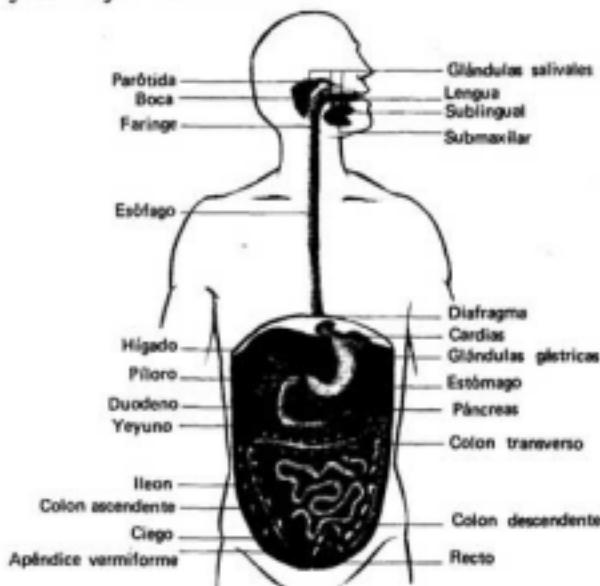
EL APARATO DIGESTIVO

En ciertos grupos de animales inferiores, como esponjas y celentéreos, a pesar de tratarse de seres pluricelulares, la verdadera digestión corre a cargo de ciertas células, las cuales capturan pequeñas presas y las digieren en vacuolas digestivas, lo mismo que hacen los protozoos.

Por el contrario, en los demás animales (excepción hecha de algunos parásitos), el alimento capturado ingresa en un conjunto de cavidades en las que se realiza su tratamiento mecánico y químico. Este conjunto de cavidades que tienen por objeto la digestión de los alimentos recibe el nombre de aparato digestivo.

EL APARATO DIGESTIVO DE LOS VERTEBRADOS

Los aparatos digestivos de los animales son variadísimos, pero existe un modelo general del que pocos grupos de animales se apartan radicalmente. Este modelo es el **aparato digestivo de los vertebrados**, el cual es, además, el más complejo y el mejor estudiado.



Esquema del aparato digestivo del hombre.

Consiste esencialmente el aparato digestivo de los vertebrados en un largo **tubo**, con dos comunicaciones con el exterior, la **boca** y el **ano**. Por la primera entran los alimentos, que van siendo objeto de diferentes tratamientos en los distintos tramos del tubo por los que van circulando. Por el último, los escasos restos indigeridos, más los productos de desecho que se han producido en el interior del tubo digestivo, salen al exterior en forma de excrementos o heces fecales.

En la misma pared del tubo digestivo o en forma de órganos anatómicamente distintos, se encuentran diversas **glándulas** cuya misión es la secreción de los jugos digestivos que modificarán químicamente los alimentos.

Los alimentos reciben también tratamiento mecánico en varias partes del tubo digestivo, pero fundamentalmente este tratamiento se ejerce en la primera cavidad del tubo digestivo, en la **boca**, órgano de importancia excepcional en los vertebrados.

LA BOCA DE LOS VERTEBRADOS

La **boca** de los vertebrados, situada al comienzo del tubo digestivo, es un órgano que sirve en primer lugar para la **prensión de los alimentos**. Con la excepción de los escasos vertebrados que utilizan para tomar los alimentos las extremidades superiores (hombres, primates, ciertos roedores, etc.) es, además, el único órgano que sirve a este fin. Pero como, además, los alimentos de los vertebrados son muy variados, se puede fácilmente comprender que las modificaciones adaptativas que ha sufrido la boca a este fin en los distintos grupos han sido muy numerosas, sin mencionar las adaptaciones para la **defensa** y la **agresión** (colmillos de los jabalíes, dientes venenosos de ciertas serpientes, etc.), la utilización de la boca como **instrumento** (para llevar a las crías o los materiales para el nido) o su empleo para colaborar a la **fonación** y al **lenguaje**.

La función **prensora** de la boca es debida, en los distintos vertebrados, a los **bordes de la boca**, a los **dientes** o a la **lengua**. Muchos reptiles que carecen de dientes, como los lagartos y tortugas, así como todas las aves, toman el ali-

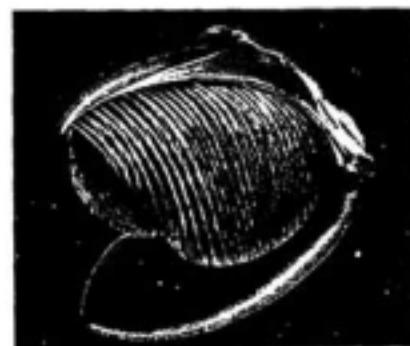
mento con los bordes de la boca, que en las aves y en las tortugas se han adaptado a esta función protegiéndose con un pico córneo.

Un caso notable de adaptación de los bordes de la boca a la prensión del alimento es el de las **crías de los mamíferos**. Dado que se alimentan exclusivamente de la leche segregada por las mamas de la madre, la cría tiene necesidad de **succionar** (mamar), para lo cual necesita poseer unos labios blandos que sean capaces de adaptarse estrechamente a la mama materna, haciendo entre ésta y la boca un cierre hermético que haga posible la succión. Aunque el mamífero adulto tenga ya otro tipo de alimentación, subsiste la presencia de los labios, que pueden también ayudar mucho en la prensión de los alimentos (por ejemplo, en los caballos, y más todavía en los elefantes, cuya utilísima trompa no es más que un órgano formado a expensas de la nariz y del labio superior).

La **lengua** también es utilizada por algunos vertebrados como un órgano preensor de alimentos, como en el caso de la rana o en el del camaleón, que capturan insectos agarrándolos con la lengua; algunos mamíferos, como la jirafa, toman las hojas de los árboles con la lengua, y otros, como el oso hormiguero, utilizan la lengua como órgano de captura de insectos gracias a la pegajosidad de su saliva; muchos otros mamíferos se sirven también de la lengua para tomar alimentos o bebidas, como los perros y gatos que lamen el plato donde toman la comida.

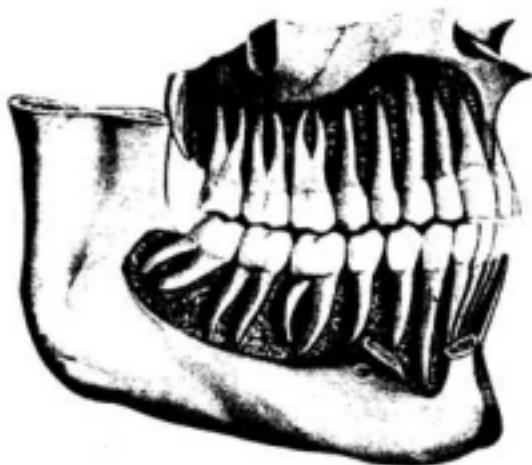
Es digna de mencionarse una notable adaptación de la boca a la captura del alimento, representada por las **«barbas»** de las ballenas, especie de láminas córneas que bajan desde el paladar a la lengua y que forman un filtro en el que quedan detenidos todos los pequeños animales acuáticos que forman el alimento de la ballena.

La boca es también el órgano de almacenamiento de los alimentos en algunos mamíferos. Muchos vertebrados, más o menos inermes, se ven en la precisión de tomar deprisa sus alimentos y después, al abrigo de sus enemigos, comerlos con mayor sosiego. Para ello necesitan almacenarlos, misión que se encomienda en las aves al buche, en los rumiantes a la panza, pero que en ciertos monos o roedores se hace en los **abazones** o bolsas bucales dilatables.



Adaptaciones de la boca y de sus órganos.

1. Colmillos agresivos del jaguar.
2. Dientes venenosos de serpiente.
3. Labios blandos de mamífero.
4. Lengua prensora de rana.
5. Pico cónico de aves.
6. Láminas córneas de la boca de ballena.



LA DIGESTION EN LA BOCA

En la boca se realiza también en ciertos vertebrados la primera parte de la digestión propiamente dicha; es decir, la **preparación** de los alimentos. Esto no sucede de ordinario en los peces, reptiles, anfibios ni aves, que suelen tomar sus presas enteras, con algunas excepciones (sobre todo entre los peces), pero es la regla entre los mamíferos, que tienen una dentadura adaptada a la preparación mecánica de los alimentos más que a su captura. Gracias a las adaptaciones de los dientes, los alimentos, cortados, desgarrados y machacados por **incisivos, caninos y molares**, respectivamente, se convierten en una pasta que, mezclada con la saliva, se denomina bolo alimenticio, el cual será deglutiido a continuación.

La **saliva** tiene una importancia excepcional en esta preparación del alimento. Este líquido, segregado por tres pares de glándulas (las glándulas salivales) contiene, al lado de una gran riqueza en agua y otras sustancias, dos componentes de importancia, la **mucina** y la **ptialina**.

La **mucina** confiere a la saliva sus cualidades físicas más destacadas, es decir, hace que la saliva sea **filante** (no gotea como el agua, sino se estira en gotas filamentosas) y **resbaladiza**.

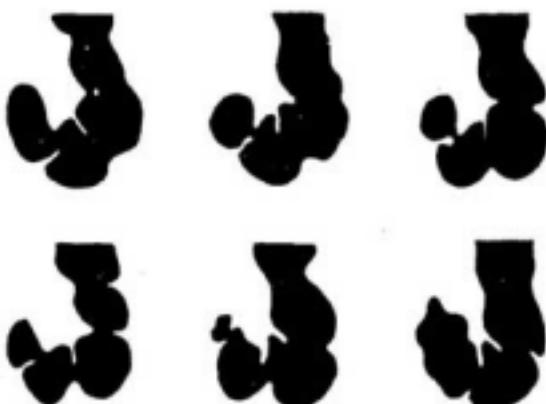
De esta manera, el bolo alimenticio se desliza fácilmente hacia el istmo de las fauces en la deglución o acto de tragarse. En cuanto a la **ptialina**, es la primera de las enzimas digestivas que obra químicamente sobre los alimentos a lo largo del tubo digestivo.

La ptialina obra solamente en medio alcalino y su sustrato es el **almidón**, al que hidroliza, convirtiéndolo en **maltosa**.

Es, pues, una **amilasa**. La ptialina solamente se encuentra en la saliva de los mamíferos y no en todos (falta en los rumiantes) y su acción química es de pequeña importancia en el conjunto de la digestión. Según las necesidades momentáneas del organismo se segregan una saliva rica en ptialina (tipo **seroso**) u otra pobre en esta enzima y rica en mucina (tipo **mucoso**).

LA DEGLUCIÓN

La **deglución** o acto de ingresar los alimentos por el istmo de las fauces es un acto complicado, que lleva consigo una serie de reflejos. A consecuencia del estímulo (el contacto del alimento con el fondo de la boca) se producen unos movimientos coordinados (en el hombre, el cierre de la epiglotis, el ascenso de la laringe, la elevación de la lengua, etc.) que fuerzan al bolo alimenticio, lubricado por la mucina salival, a pasar hacia el esófago.



Sucesivas siluetas de un estómago humano que realiza movimientos peristálticos.

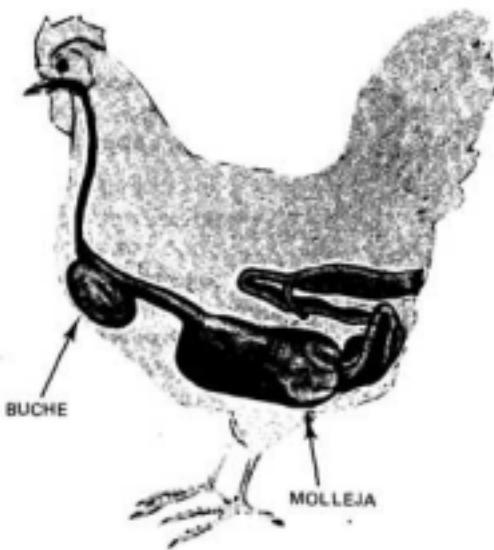
El proceso de la deglución se completa con el paso del alimento a lo largo del esófago, mediante un **movimiento peristáltico**, en el que la contracción sucesiva de las distintas fibras musculares anulares de la pared de este tubo lanza hacia el **estómago** al bolo alimenticio. Este movimiento se hace en el hombre a favor de la acción de la gravedad, pero en la mayor parte de los mamíferos, que comen con la boca más baja que el estómago, el movimiento del esófago lleva el bolo alimenticio hacia arriba. Esto sucede también cuando el animal bebe agua, la cual asciende hacia el estómago por un movimiento peristáltico del esófago, recorriendo a veces un trayecto muy largo, como en el caso de las jirafas.

LA DIGESTION ESTOMACAL

Excepto en las aves, en las que a continuación del esófago está situado el **buche**, donde almacenan los alimentos, en los vertebrados el compartimento siguiente del tubo digestivo es el **estómago**. En este órgano permanecen los alimentos durante un largo tiempo sufriendo la acción del **jugo gástrico**, segregado por unas glándulas situadas en el espesor de la pared estomacal. El jugo gástrico es un líquido **ácido**, debido a que uno de sus componentes es **ácido clorhídrico**. El ambiente ácido paralizaría, pues, inmediatamente la acción de la ptilalina salival, si no fuese porque el jugo gástrico, como está segregado por la pared del estómago, no empapa al principio toda la masa de alimento, dando así tiempo a que la digestión parcial del almidón comenzada en la boca se continúe algún tiempo en el estómago.

Sin embargo, el contenido del estómago se mezcla paulatinamente con el jugo gástrico, debido a que las capas musculares de la pared estomacal se contraen fuertemente, determinando unos **movimientos peristálticos** que mueven a la masa ingerida hacia la salida del estómago, o **píloro**; como durante la digestión estomacal el piloro permanece cerrado, los movimientos peristálticos estomacales tienen como resultado la mezcla homogénea de los productos ingeridos con el jugo gástrico, dando una masa semiliquida llamada **quimo**.

El jugo gástrico de los mamíferos contiene, además de ácido clorhídrico, tres enzimas, el **cuajo**, la **lipasa gástrica** y la **pepsina**.

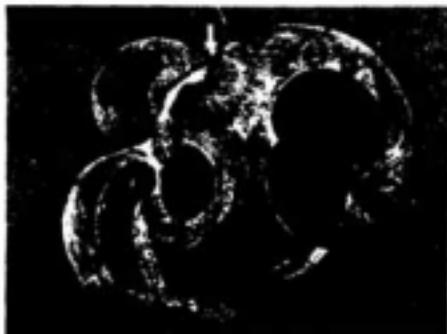


Aparato digestivo de un ave, mostrando el buche y la molleja.

El **cuajo** es sobre todo abundante en el estómago de los mamíferos jóvenes; su acción es la de convertir el **caseinógeno** de la leche en **caseína**, es decir, la de **coagular** aquel líquido, único alimento de las crías de los mamíferos, por lo que es esencial para la vida de estos lactantes.

La **lipasa gástrica** degrada las **grasas neutras**, convirtiéndolas en **ácidos grasos** y **glicerina**. De todas maneras, su acción es cuantitativamente poco importante, ya que esta enzima no obra más que sobre la superficie de las gotas de grasa. Si la grasa no está emulsionada, su acción es insignificante, por lo que se puede decir que, en general, la lipasa gástrica tiene solamente acción sobre las **grasas emulsionadas**.

La **pepsina** es la más importante de las enzimas estomacales. Es una **proteasa**, es decir, degrada las proteínas, convirtiéndolas por hidrólisis en unas mezclas de péptidos de molécula más o menos grande. Esta enzima obra solamente en **medio ácido**, y su acción se ve también favorecida porque el **ácido clorhídrico** desnaturaliza en parte las proteínas que hidrolizará la pepsina.



Estómago de un rumiante.

LA DIGESTION EN EL ESTOMAGO DE LOS RUMIANTES

El estómago de los rumiantes está dividido en **cuatro cavidades**, apartándose así del tipo convencional del resto de los mamíferos y siendo también distintos que en éstos los fenómenos digestivos.

La primera cavidad es la **panza**, que es un gran saco a donde va a parar la hierba que el animal come a grandes bocados. Como la **celulosa** constituye una parte cuantitativamente muy importante de la hierba que come el animal y no existe en estos mamíferos (ni en ningún vertebrado) enzima alguna capaz de degradar esta sustancia, la panza de los rumiantes se ha convertido en una gran **cámara de fermentación**, en la cual se utilizan las actividades enzimáticas de los microorganismos para digerir la celulosa, mediante las **celulasas** que estos microorganismos poseen.

Los microorganismos de la panza son unas **bacterias**, especializadas en la digestión de la celulosa y del almidón, que producen una fermentación cuyos productos finales son **ácido láctico**, **ácido propiónico**, **ácido acético** y gran cantidad de gases (sobre todo CO_2). Existen también numerosísimos **protozoos**, que también se alimentan de la celulosa. Todas las bacterias y protozoos sintetizan sus propias proteínas a expensas de los alimentos del rumiante, y cuando mueren al pasar a otros compartimientos digestivos el animal aprovechará este aporte proteico.

Para que se realice la fermentación tiene que haber en el interior de la panza un ambiente caliente, y sobre todo muy rico en agua. El necesario aporte de agua a la cámara de fermentación corre a cargo de la saliva, que en estos animales es abundantísima, y que segregá sin cesar, llenando la panza.

Durante la fermentación, el animal colabora a la predigestión por medio de la **rumiación**. Consiste esta operación en que pequeñas porciones del contenido de la panza pasan al segundo departamento del estómago, el **bonete** o **redecilla**, y desde allí son elevados, merced a unos movimientos antiperistálticos del esófago, a la boca. Aquí este alimento fermentado se muele lentamente por los molares del animal, que lo traga de nuevo a continuación para mandarlo al **libro**, tercer compartimento del estómago.

El libro se llama así por tener unos anchos repliegues membranosos en su interior. Mediante estos repliegues, se absorbe en esta zona una gran cantidad de agua, lo cual hace que a pesar de la enorme cantidad de saliva segregada, las necesidades en agua de estos animales no sean excesivas.

Por último, la papilla así formada pasa al **cuajar**, que es la parte del estómago en donde hay glándulas secretoras de jugo gástrico.

LA DIGESTION EN EL INTESTINO DELGADO

Una vez realizada la digestión estomacal, el quimo sale por el píloro al **intestino delgado**. El quimo tiene, como ya sabemos, una fuerte reacción ácida, mientras en el **duodeno**, o primera parte del intestino delgado, reina un ambiente alcalino.

Pues bien, cada vez que se abre el píloro para dejar pasar un poco de quimo, la acidez de éste desencadena un reflejo que cierra de nuevo el píloro. Este no se abrirá de nuevo hasta que no haya sido neutralizada la porción de quimo que pasó primero, y así sucesivamente. Por consiguiente, el estómago no se vacía de una vez en el duodeno, sino muy lentamente.

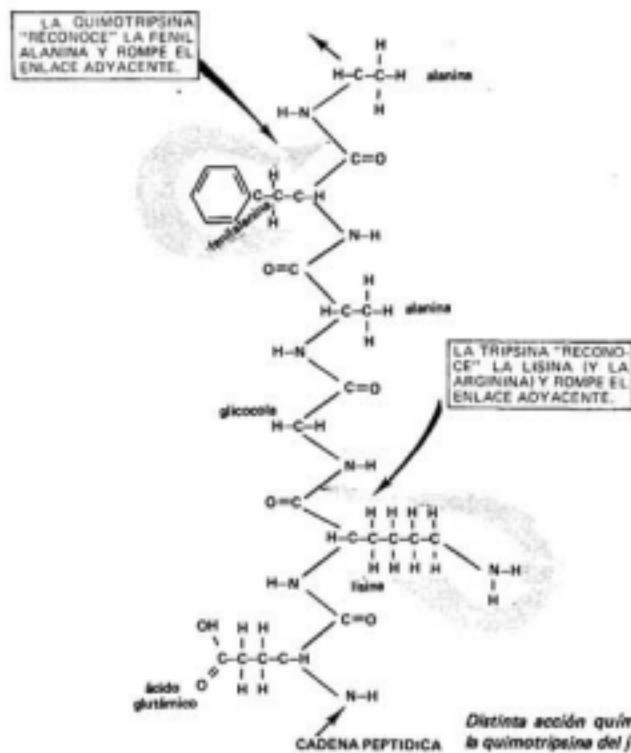
En el intestino delgado, el alimento sufre la acción del **jugo pancreático**, de la **bilis** y del **jugo intestinal**. La acción química de estos jugos, combinada con la acción mecánica del intes-

tino delgado, por la cual una intensa acción peristáltica va transportando el contenido del mismo hasta el intestino grueso, convierte al primitivo quimo ácido, procedente del estómago, en un líquido llamado **quilo**, que es francamente alcalino.

EL JUGO PANCREÁTICO

El jugo pancreático es producido por el páncreas, glándula que en el hombre desemboca en el duodeno. Es un jugo que contiene muy distintas enzimas, las cuales actúan en medio alcalino. Por esta razón, en el jugo pancreático existe $\text{CO}_3 \text{HNa}$, que sirve para neutralizar la acidez del quimo.

En primer lugar, el jugo pancreático contiene dos proteasas, la **trípsina** y la **quimotripsina**. Estas proteasas actúan ambas hidrolizando las **proteínas** y los **péptidos** procedentes de la digestión pépsica de las proteínas en el estómago; su acción se diferencia en que rompen enlaces peptídicos distintos: la



Distinta acción química de la trípsina y de la quimotripsina del jugo pancreático.

tripsina cataliza la hidrólisis de los enlaces peptídicos que están junto a los aminoácidos **lisina** y **arginina**, mientras que la **quimotripsina** rompe los enlaces peptídicos situados junto a la **tirosina** y a la **fenilalanina**. En ambos casos, el resultado de la acción enzimática es la aparición en el intestino de **polipéptidos de pequeño peso molecular**. Hay que advertir, además, que la tripsina es segregada por el páncreas al estado de una proteína no enzimática llamada **tripsinógeno**, la cual es activada por una secreción de la mucosa intestinal, la **enzi-ma enterocinasa**.

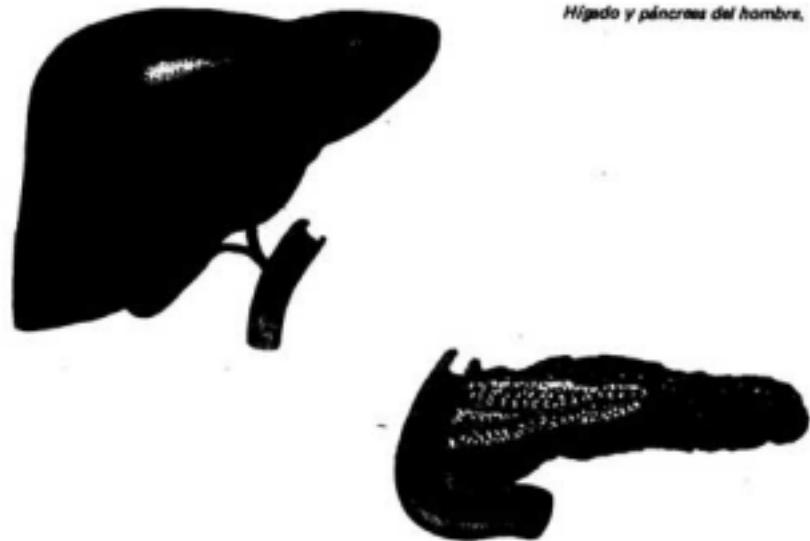
En el jugo pancreático hay que señalar, además: Unas nucleasas que degradan los **ácidos nucleicos** en **nucleótidos**; unas **carboxipeptidasas**, cuya acción se ejerce sobre los **polipéptidos**, a los que decarboxilan; una **amilasa pancreática**, que actúa sobre el **almidón**, degradándolo por hidrólisis a **maltoza**; una **maltasa**, que hidroliza a esta **maltoza** y a la formada por la acción de la ptialina, convirtiéndola en **glucosa**; y, por último, una **lipasa pancreática**, que hidroliza las **grasas**, desdoblándolas en **ácidos grasos** y **glicerina**.

La acción de esta última enzima está condicionada por la de la **bilis**, secreción del hígado de la que se hablará a continuación.

LA BILIS

El **hígado**, glándula productora de la **bilis**, es un órgano de compleja función, que sirve a la vez varios objetivos muy importantes para los animales: es el órgano que sirve para la destrucción de los glóbulos rojos, después de que éstos han circulado varias semanas y a medida que van siendo sustituidos por los que se van formando en la médula de los huesos; en el hígado se realiza la transformación de glucosa en glucógeno y viceversa, y se elaboran grasas a partir principalmente de hidratos de carbono; también tiene esta víscera una acción antitóxica importante, mediante unas acciones bioquímicas sobre los venenos de toda índole, etc.

A consecuencia de la realización de sus múltiples funciones, el hígado segregá un líquido, la **bilis**, que es en parte un producto de excreción y en parte juega un importante papel en la digestión en el intestino delgado.



La bilis, que en la mayoría de los vertebrados se concentra antes de verterse en el intestino en una pequeña **vesícula biliar**, está formada por agua, **sales minerales** (cloruros y fosfatos alcalinos), **sales biliares** (glicolato y taurocolato sódicos), **pigmentos biliares** (bilirrubina y biliverdina), **colesterina** y **mucina**.

Las **sales minerales** contribuyen a neutralizar la acidez del quimo gástrico. Las **sales biliares** disminuyen la tensión superficial del medio ambiente y, combinadas con los ácidos grasos, forman unos jabones que la disminuyen aún más, sobre todo en la vecindad de las gotas de grasa, que se emulsionan fuertemente, permitiendo así la acción eficaz de la lipasa pancreática.

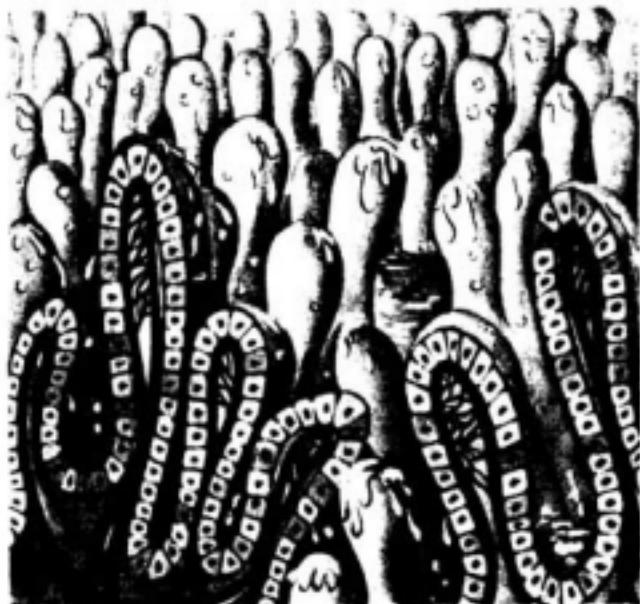
La **mucina** tiene en la bilis un papel puramente mecánico, para un mejor deslizamiento del quilo a lo largo del intestino, y en cuanto a los **pigmentos biliares** y la **colesterina**, procedentes de la destrucción de los glóbulos rojos, son típicos productos de excreción, que son eliminados por el intestino, sin función alguna en la digestión.

EL JUGO INTESTINAL

Segregado el Jugo intestinal por una gran cantidad de glándulas situadas en la pared del intestino delgado, contiene un buen número de enzimas, destinadas a completar la digestión de los alimentos. Son éstas: unas **aminopeptidasas**, que actúan sobre los **polipéptidos**, desaminándolos en su grupo amino terminal; unas **peptidasas**, que hidrolizan los péptidos en aminoácidos; una **lipasa intestinal**, que ejerce sobre las grasas igual acción que las lipasas gástrica y pancreática; maltasa, **sacarasa** y **lactasa**, que descomponen por hidrólisis los disacáridos maltosa, sacarosa y lactosa, respectivamente, en sus componentes monosacáridos; y, por último, **nucleotidasa** y **nucleosidasa**, que terminan la degradación de los ácidos nucleicos.

LA ABSORCION INTESTINAL

El intestino delgado está tapizado interiormente por una serie de eminencias muy finas, que le dan un aspecto aterciopelado, llamadas **vellosidades intestinales**. Cada vellosidad se compo-



Vellosidades
intestinales.

ne de una red de vasos sanguíneos y de vasos linfáticos, tapizada por un epitelio de células cilíndricas que se terminan en su parte libre por unas **microvellosidades** solamente apreciables por la microscopia electrónica. Al nivel de estas células epiteliales es donde se produce la **absorción** de los productos de la digestión (hexosas, aminoácidos, ácidos grasos, glicerina, bases púricas y pirimidínicas, pentosas, etc.), al mismo tiempo que se absorbe una gran cantidad de agua.

Existen dos vías principales para los productos absorbidos al nivel de las vellosidades intestinales. Por una parte, la mayoría de las pequeñas moléculas van a parar, atravesando las vellosidades intestinales, al **hígado**, llevadas por una vena especial, la **vena porta**, que reparte estos productos por todas las células del hígado, en donde se almacenan los glucídios en forma de glucógeno, regulándose en él así la cantidad de glucosa circulante, como se verá más tarde.

De otro lado, las grasas se absorben en forma de ácidos grasos y glicerina y en este estado pasan a través de las células del epitelio intestinal, pero inmediatamente se vuelven a sintetizar, y van a parar, ahora en forma de gotitas de grasa, a los vasos linfáticos que están en el eje de cada vellosidad.

En las horas que siguen a una comida rica en grasa, estos vasos adoptan un color lechoso, lo que les ha hecho merecer el nombre de **vasos quilíferos**. Los vasos quilíferos, reunidos a otros en gruesos vasos linfáticos, irán a parar a la circulación general sanguínea, que pondrá las grasas a disposición de las células del cuerpo.

LA DIGESTION EN EL INTESTINO GRUESO

En el **Intestino grueso** se realiza la terminación de los procesos digestivos, con la eliminación de las **heces fecales**. Durante la permanencia en este órgano de los materiales restantes, se absorbe gran cantidad de agua, y los restos indigeridos, así como las células desprendidas, los jugos no utilizados, etc., son objeto de una degradación por parte de una gran cantidad de bacterias que constituyen la **flora intestinal normal**. En el hombre y en muchos otros mamíferos, estas bacterias son útiles para eliminar algunas materias resistentes a la digestión in-

testinal y porque sintetizan algunas vitaminas que son absorbidas por el intestino grueso, pero en algunos herbívoros la importancia de esta flora del intestino grueso es excepcional. En los caballos, por ejemplo, una parte del intestino grueso, el ciego, desempeña un papel de **cámaras de fermentación** semejante al que ejerce la panza en los rumiantes, y en él existe una numerosa población de bacterias y protozoos que digieren la celulosa en beneficio del animal.



LOS ALIMENTOS

Las necesidades metabólicas de los organismos heterótrofos se cubren exclusivamente con los alimentos orgánicos que, como hemos visto, después de sufrir el proceso digestivo, son absorbidos en forma de compuestos de bajo peso molecular para ser puestos a disposición de las células.

Las células utilizarán estos compuestos de moléculas pequeñas para cubrir sus necesidades energéticas y plásticas, es decir, para degradarlas por los mecanismos bioquímicos ya conocidos y obtener de ellas la energía correspondiente, o para sintetizar, utilizándoles como materia prima, los materiales perdidos en el funcionamiento celular o que sean necesarios para el crecimiento del organismo.

Estas necesidades se pueden cifrar en cada caso, lo que es de tan gran importancia para mantener la salud del hombre y de los animales que dependen de aquél para su alimentación, que se ha creado toda una ciencia, la dietética, para el progreso de nuestros conocimientos sobre la alimentación humana y animal.

LAS NECESIDADES CALORICAS DE LOS ORGANISMOS

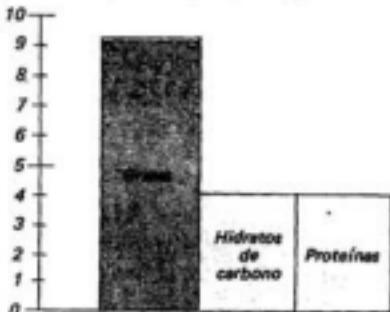
Las necesidades de los organismos en alimentos son de dos tipos, unas **cuantitativas** y otras **cualitativas**, lo que equivale a decir que importa tanto la **cantidad** como la **naturaleza** de los alimentos. Veamos, en primer lugar, las necesidades cuantitativas.

Los organismos consumen constantemente **energía** en variadas manifestaciones; la forma más aparente de gasto de energía es en forma de **energía mecánica** (movimiento), pero existen otras formas igualmente importantes. Así, por ejemplo, la energía que se disipa de los cuerpos en forma de **calor**, que es muy aparente en los animales homeotermos, como aves y mamíferos, pero que se puede medir en todos los animales e incluso en las plantas; la **energía química** necesaria para las síntesis de toda índole; la **energía eléctrica** producida en las membranas celulares, pero sobre todo en las células nerviosas; la **energía luminosa**, producida por los órganos correspondientes en algunos insectos (gusano de luz) y peces, etc.

Para el estudio de las necesidades energéticas de los organismos se ha convenido, sin embargo, en utilizar las unidades que sirven para medir el **calor**, las **Kilocalorías**, por lo cual es frecuente hablar de las **necesidades calóricas** de los organismos.

Estas necesidades calóricas tienen que ser cubiertas necesariamente con la energía contenida en los alimentos, que es distinta según la índole del alimento.

El valor energético de los **hidratos de carbono** es de 4,1 Cal. por gramo; el de las **grasas**, de 9,3 Cal. por gramo, y el de las **proteínas**, de 4,1 por gramo.



Valor comparativo en calorías, de un gramo de grasa, un gramo de hidratos de carbono y un gramo de proteínas.

De acuerdo con estas cifras, en cuanto determinemos las necesidades calóricas de un organismo, estaremos en condiciones de fijar las cantidades ponderales que necesita tomar de dichos principios inmediatos, para reponer las pérdidas en calorías.

DETERMINACION DE LAS NECESIDADES CALORICAS

La determinación de las necesidades calóricas de un organismo puede hacerse por **calorimetría directa**, en los aparatos llamados **calorímetros**, en cuyo interior puede permanecer un animal o un hombre durante cierto tiempo, calculándose la energía que recibe con los alimentos y midiendo la que disipa en forma de calor, la que transforma en trabajo mecánico, la que consume en la evaporación de agua por la piel y los pulmones, así como la energía que resta ligada a los compuestos orgánicos contenidos en las heces, la orina, el sudor, etcétera. Con estos datos puede hacerse un estudio del gasto de energía por unidad de tiempo que hace un organismo, incluso en diferentes condiciones de vida.

Encerrando a un hombre o un animal en un calorímetro, vemos que el número de calorías que gasta está en relación con el número de músculos que se pone en funcionamiento. Así, por ejemplo, el hombre tumbado gasta 1,14 Cal. por minuto, el hombre de pie 1,30 Cal. por minuto, y si además de estar de pie está moviendo los brazos el consumo se eleva a 3,13 Cal. por minuto.

EL METABOLISMO BASAL

Interesa ahora saber cuál es el número de calorías necesarias para que un animal o un hombre simplemente «viva», poniendo en juego el menor número de músculos necesarios para el mantenimiento de la vida. Este gasto energético procederá de los cambios metabólicos indispensables para el mantenimiento de la vida, por lo que se denomina **metabolismo basal**.

El metabolismo basal se determina en el hombre y en los demás animales homeotermos en absoluto reposo, a la temperatura de neutralidad térmica (para el hombre vestido, 22°C) y unas 12 horas después de una comida ligera.

En el hombre adulto normal, de 70 Kg. de peso, el metabolismo basal es de 1.600 Cal. por día, las cuales se emplean en mantener la temperatura del cuerpo a 37°C, evaporar agua a través de los pulmones y del tegumento y mantener el funcionamiento de algunos órganos, como el corazón, los músculos respiratorios, los músculos del aparato digestivo, la actividad metabólica del hígado, del riñón, etc.

El metabolismo basal es más elevado en los jóvenes, y varía también en algunas enfermedades, que incrementan o disminuyen las actividades metabólicas.

En los **animales polquillotermos**, o de temperatura variable, las reacciones metabólicas se producen a distinta velocidad según la **temperatura ambiente**, de manera que ésta influye mucho en el metabolismo basal: En un lagarto, el metabolismo basal es en invierno muy bajo, elevándose en el verano, cuando el animal acelera su metabolismo celular.

En los **animales homeotermos**, el metabolismo basal depende también de la temperatura ambiente, pero en este caso, dado que la temperatura del cuerpo es siempre la misma, esto se debe a que en tiempo frío el animal se ve obligado a acelerar sus reacciones metabólicas productoras de energía con el fin de producir el suficiente calor para contrarrestar la temperatura ambiente; si la temperatura exterior es demasiado elevada, el homeóntero tiene también la necesidad de poner en marcha otros mecanismos de regulación térmica de signo contrario, haciéndose igualmente más alto el metabolismo basal.

EL METABOLISMO TOTAL

El metabolismo total representa las necesidades calóricas totales de un organismo en actividad. Como es lógico, es siempre más elevado que el metabolismo basal, ya que la actividad determina un incremento funcional variable.

Se ha determinado el metabolismo total en el hombre, que arroja las siguientes cifras:

Metabolismo total

	Necesidades calóricas diarias	
	mujeres (peso medio 56 kg)	varones (peso medio 70 kg)
Trabajo sedentario	2.100 Cal.	2.500 Cal.
Trabajo moderadamente activo	2.500 Cal.	3.000 Cal.
Trabajo muy activo	3.000 Cal.	4.500 Cal.



Hombres en trabajo sedentario. Necesitan 2.500 Cal. diarias.



Hombres en trabajo moderadamente activo. Necesitan 3.000 Cal. diarias.



Hombres en trabajo muy activo. Necesitan 4.500 Cal. diarias.

LAS NECESIDADES PLASTICAS

Conocidas ya las necesidades energéticas de los organismos y sabido el número de calorías por gramo que proporcionan los distintos alimentos, podremos calcular muy fácilmente las cantidades de cualquier alimento a ingerir para que aporte las necesarias calorías, pero aún así no podremos arbitrariamente alimentar a un animal con cualquier tipo de alimento.

Sabemos que los hidratos de carbono y las grasas son compuestos de C, O e H, exclusivamente y que entre las pérdidas sufridas por el organismo hay una serie de proteínas contenidas en secreciones, desescamaciones epiteliales, pelos, etcétera; en estas proteínas hay N y S, elementos que no se pueden reponer a su vez más que con la administración de proteínas en la dieta. Estas necesidades son de tipo **plástico**, ya que el aporte de sustancias nitrogenadas es necesario para la elaboración de dichos componentes estructurales del protoplasma.

La cantidad de proteínas que un animal sometido a dieta absoluta o puramente hidrocarbonada pierde diariamente y que forzosamente hay que reponer, se llama **mínimo proteico**, el cual, por término medio, en un hombre adulto normal es de 70 g. diarios de proteínas; es decir, aproximadamente un gramo por kilogramo de peso y cada 24 horas.

En los animales en crecimiento o en los niños, este mínimo proteico se aumenta mucho, y en el hombre se calculan las siguientes cifras: a los 3 años, 4 g. por Kg. al día; a los 10 años, dos gramos, y a los 20 años, 2,5 g.

LA RACION ALIMENTICIA

Lo dicho hasta ahora nos indica la necesidad de comer **racionalmente**, de manera que todos los días se ingieran las cantidades adecuadas de hidratos de carbono, de grasas y de proteínas en cantidades adecuadas a las necesidades del organismo, tanto si se trata de seres humanos, como de animales que el hombre cría. Las cantidades que un animal debe comer cada día constituyen la llamada **ración alimenticia**.

Para el hombre y por término medio, se aceptan dos tipos de raciones alimenticias, **ración de entretenimiento**, necesaria para el mantenimiento haciendo vida de reposo, y **ración de trabajo**, variable según las necesidades calóricas del tipo de trabajo de que se trate.

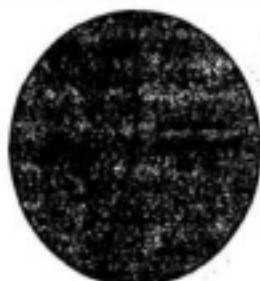
He aquí la ración de entretenimiento para una persona adulta-normal:

	Cal.
100 g. de proteínas	410
70 g. de grasas	650
300 g. de hidratos de carbono	1.230
	<hr/>
Total.	2.290



Y la ración de trabajo para un trabajo moderadamente activo:

	Cal.
100 g. de proteínas	410
100 g. de grasas	930
400 g. de hidratos de carbono	1.640
	<hr/>
Total	2.980



Se observará que la cantidad de proteínas no varía en ambas raciones y que está algo por encima del mínimo proteico calculado para un varón de 70 Kg.; esto es debido a que en las raciones alimenticias se calcula una cifra por encima de dicho mínimo proteico, que es el **mínimo higiénico proteico**.

LOS ELEMENTOS INORGANICOS

Además de los elementos C, H, O, N y S, contenidos en hidratos de carbono, grasas y proteínas, la materia viva de los animales contiene P, Ca, Cl, etc., elementos que han de ser administrados en la dieta alimenticia, aunque en menores cantidades.

El P se encuentra en los **ácidos nucleicos**, los cuales acompañan siempre a las proteínas naturales (carne, pescado), así como en ciertos **lipoides**, como los fosfátidos, que también de ordinario van junto con las grasas y con las proteínas naturales.

En cuanto al Cl, Na, K, Ca, Mg, etc., se encuentran también en la dieta alimenticia normal en cantidad suficiente. El Mg se encuentra en abundancia en la clorofila de las plantas verdes, el Ca en la leche y el K ampliamente distribuido en los vegetales. El Cl y el Na, elementos importantes, presentes en la materia viva, sobre todo el último, en cantidad relativamente importante, entran en la alimentación de los animales en forma de sal común.

LAS VITAMINAS

Las células animales tienen unos mecanismos metabólicos por medio de los cuales ejercen una **gran capacidad de síntesis**.

Sin embargo, esta capacidad no es ilimitada y existen algunas moléculas de arquitectura muy complicada que el organismo animal **no puede sintetizar**.

Estas moléculas, sin embargo, son componentes indispensables de productos biológicos de sumo interés, como por ejemplo, de coenzimas, por lo que el organismo no puede prescindir de ellas y las obtiene ya sintetizadas de los organismos vegetales, cuya capacidad de síntesis biológica es mucho mayor.

Estas sustancias que el organismo tiene que tomar ya elaboradas generalmente en cantidades de poca consideración se llaman **vitaminas**.

Un ejemplo contribuirá a aclarar el concepto de vitamina. Recordaremos que el NAD es un importante vector de hidrógeno en el metabolismo energético celular. Este compuesto está formado por dos restos de **ribosa**, dos de **ácido fosfórico**, un resto de **adenina** y uno de **nicotinamida**. Pues bien, todos estos restos son sintetizados por el organismo animal, excepto la **nicotinamida**, que tiene que tomarse del exterior: esta nicotinamida es, pues, una **vitamina** (la vitamina antipelagrosa), cuya ausencia en la dieta da lugar a anomalías metabólicas que se traducen en trastornos funcionales.

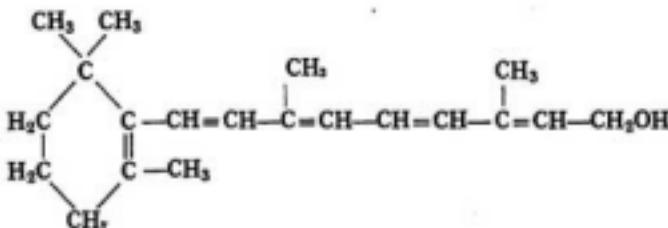
Las vitaminas fueron conocidas primeramente por los efectos que su ausencia en la alimentación producía en la salud general. Se empezaron, pues, a denominar con referencia a una determinada **enfermedad carencial** y a designarse con las letras del alfabeto. Hoy se conoce con bastante exactitud la manera de obrar y la estructura molecular de la mayoría de las vitaminas y por esta razón comienza a designárselas con sus nombres químicos. De todas maneras y a efectos prácticos las vitaminas se dividen en dos grandes grupos, según su solubilidad, las vitaminas **liposolubles** y las vitaminas **hidrosolubles**.

VITAMINAS LIPOSOLUBLES

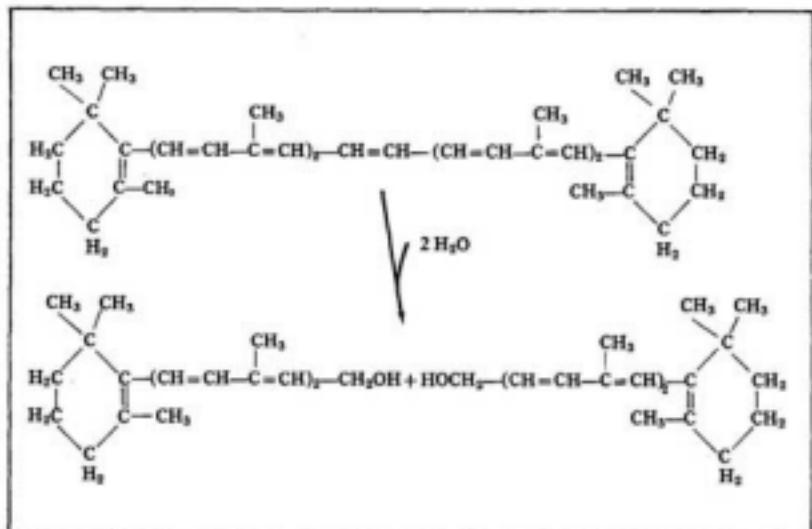
Vitamina A

Se llama también **vitamina antixerofthalmica**, porque su carencia en la dieta produce, entre otros, un síndrome de queratinización de las mucosas, especialmente de la conjuntiva, que se deseca y se hace opaca (**xeroftalmia**). Aparte de esto, como la vitamina A es un componente de la púrpura retiniana de la retina, su carencia impide la visión, especialmente en las horas crepusculares, anomalía denominada **hemeralopía**.

La vitamina A es un **carotinoide**, cuya molécula tiene la siguiente estructura:



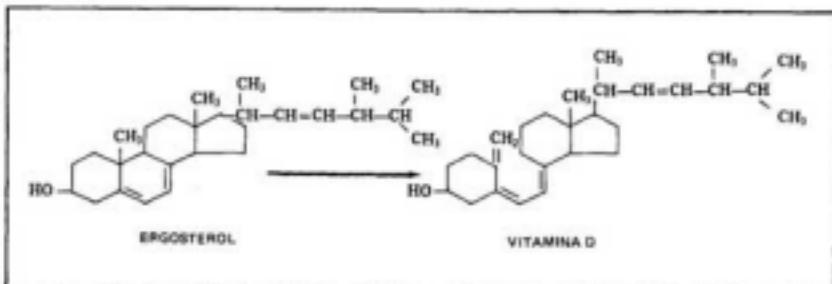
El organismo animal la adquiere en forma de **provitamina A** de diversos vegetales, como zanahorias, tomates, naranjas, etc. En estas plantas se encuentra el β -caroteno, que ingresa en el organismo y constituye la provitamina. En el hígado, la molécula de β -caroteno se rompe en dos moléculas de vitamina A:



Vitamina D

Esta vitamina es imprescindible para la fijación del calcio y del fósforo en los huesos, y su carencia determina la pérdida de rigidez del esqueleto, con las consiguientes deformaciones de los huesos en los niños y animales jóvenes que están creciendo, anomalía conocida con el nombre de **raquitismo**. Es, pues, la **vitamina antirraquítica**.

Realmente hay varias vitaminas D, todas muy parecidas desde el punto de vista químico. La más importante es la vitamina D₂, también llamada calciferol, que es un esteroide derivado del ergosterol por irradiación con rayos ultravioletas:



El organismo la adquiere en la leche, en donde es muy abundante, así como del hígado de los peces, en donde se acumula procedente de los fitoflagelados del plancton que les sirven de alimento. También puede tomarse en forma de provitamina, pues el ergosterol es abundante en los cereales, y en la piel se convierte en vitamina por la acción de los rayos solares que de este modo se convierten indirectamente en fuente de vitamina D.

VITAMINAS HIDROSOLUBLES

Complejo vitamínico B

Se reunen aquí varias vitaminas que se suelen encontrar juntas en los alimentos y que al principio se confundían todas bajo la misma denominación. Las principales son las siguientes:

Vitamina B₁ (aneurina, tiamina, vitamina antiberibérica). Su carencia determina el beri-beri, enfermedad nerviosa que se manifiesta en temblores, parálisis y extrema delgadez. Interviene en el metabolismo como coenzima de las enzimas que tienen a su cargo la decarboxilación de algunos oxoácidos,



Enfermo de pellagra (por cortesía del Dr. Porras Escudero).



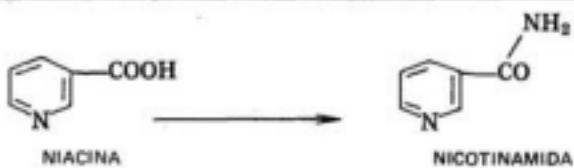
Enfermo de ricketismo (por cortesía de la Clínica Infantil "La Paz").

como el ácido pirúvico (decarboxilasas). Se encuentra en la cascarilla de los cereales y en algunas vísceras animales, como el hígado y el riñón.

Vitamina B₂ (riboflavina). Su carencia se manifiesta en diversos síntomas, como **lesiones en los labios y en la lengua** y anomalías en la visión. Forma parte de la molécula del FAD y, por consiguiente, interviene en las reacciones celulares de oxidación-reducción. Se encuentra en los cereales, de donde la puede obtener el organismo humano.

Factor P-P (pellagra-preventive, niacina, ácido nicotínico). La carencia de esta vitamina o de su derivado la nicotinamida determina una enfermedad llamada **pelagra**, que se manifiesta en una dermatitis en los lugares expuestos a los rayos solares, pues la piel se hace extremadamente sensible a ellos. La pelagra se puede prevenir y curar por la introducción en la dieta alimenticia del ácido nicotínico o de su derivado la nicotinamida, por lo que ambos productos pueden considerarse como vitamina antipelagrosa. Como se ha dicho anteriormente, este factor forma parte de la molécula del NAD y del NADP.

Se encuentra en abundancia en las levaduras, en la leche, en el tomate y en el hígado fresco.

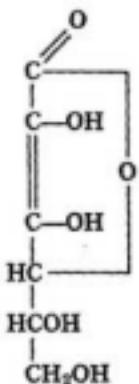


Vitamina B₁₂ (clanocobalamina). Su carencia determina una forma grave de anemia llamada **anemia perniciosa**. En su molécula hay un átomo de cobalto, y funciona como coenzima de ciertas enzimas. Se encuentra en los concentrados de hígado fresco.

Vitamina C

Esta vitamina interviene en el metabolismo de los hidratos de carbono, estando relacionada químicamente con las hexosas. Su carencia determina el **escorbuto**, enfermedad caracterizada por una serie de alteraciones, que comienzan con hemorragias e hinchazón de las encías, con caída de los dientes, y que llegan hasta la muerte del individuo.

Se encuentra en gran cantidad en las verduras frescas y en los frutos agrios, como la naranja o el limón, habiéndose podido obtener cristalizada de estos jugos y, más tarde, sintetizar en el laboratorio. Su fórmula es muy sencilla, denominándose químicamente ácido ascórbico:



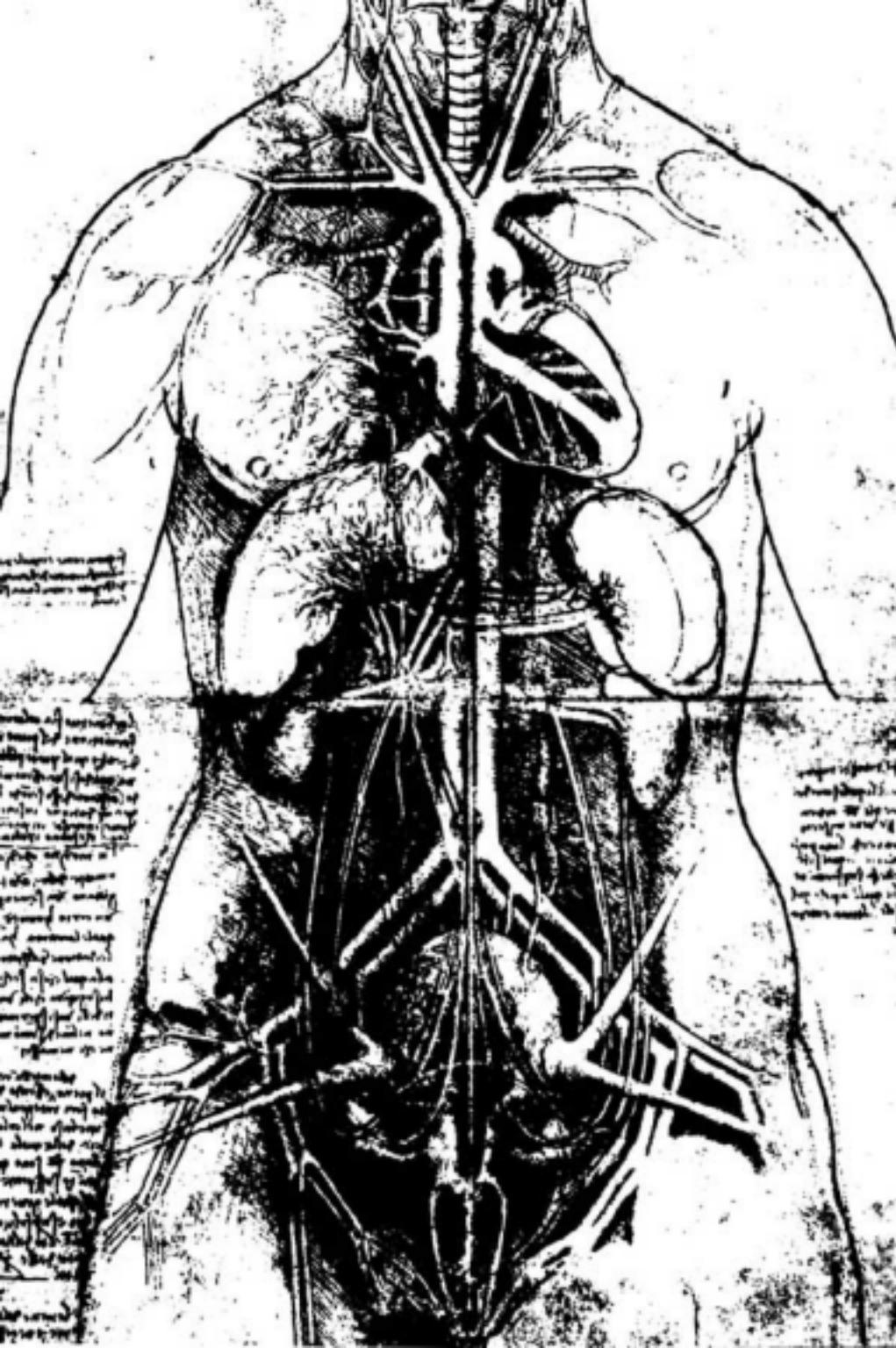
ACIDO ASCORBICO (VITAMINA C)

A diferencia de otras vitaminas, que es suficiente que estén presentes en la dieta alimenticia en cantidades muy pequeñas, el organismo utiliza el ácido ascórbico en abundancia, de manera que se recomienda la toma diaria de 70 a 75 mg. diarios para los adultos, y de 30 a 60 mg. diarios para los niños hasta los diez años. Estas cantidades deben aumentarse hasta los 100 a 150 mg. diarios en los casos en que el organismo hace mayor consumo de ácido ascórbico, como en enfermedades infecciosas, y embarazo o crianza en la mujer.

Vitamina E

Se denominan también **tocoferoles** y son sustancias cuya carencia en la dieta alimenticia determina la **esterilidad**, producida en los animales machos por la regresión y la desaparición del epitelio espermatógeno y en las hembras por la reabsorción del feto.

Se encuentran en abundancia en la leche, en los músculos, en los huevos y, sobre todo, en el germen de los cereales.



EL TRANSPORTE EN LOS ANIMALES PLURICELULARES

En los animales pluricelulares los problemas de transporte se reducen a un mínimo. Dado que cada ser unicelular es autosuficiente y desempeña todas las funciones que competen al ser vivo, el problema de transporte más arduo que puede presentarse es trasladar determinada sustancia u objeto, del exterior de la célula al interior, o de una parte a otra de la célula; distancias tan minúsculas que, como hemos visto, basta con procesos de difusión, de transporte facilitado a través de membranas, de fagocitosis y de pinocitosis para resolverlo.

En los pluricelulares, por el contrario, los problemas de transporte de los materiales son francamente complicados, ya que, debido a la especialización de las células de los tejidos, frecuentemente los materiales producidos masivamente en un punto del organismo, han de transportarse a otro u otros lugares, distantes a veces muchos centímetros del punto de producción. Para resolver estos problemas han ido apareciendo en los organismos animales unos aparatos que, en su más alta especialización son dos, intimamente conectados, el aparato respiratorio y el aparato circulatorio.

◀ Dibujo anatómico en que se aprecian venas y arterias, original de Leonardo da Vinci.

EL TRANSPORTE DE LOS GASES RESPIRATORIOS

Cuando hablamos del metabolismo celular tuvimos ocasión de ver el papel que desempeña el oxígeno en el proceso respiratorio, como fijador del hidrógeno desprendido en las reacciones metabólicas de oxidación, así como de darnos cuenta del desprendimiento de CO₂ en muchas reacciones del proceso respiratorio. De ello se desprende que durante dicho proceso respiratorio, las células intercambian con el medio estos dos productos, tomando el O₂ y desprendiendo el CO₂.

RESPIRACION CUTANEA

En los animales muy sencillos, como las esponjas, los ctenóforos y muchos gusanos, el O₂ y el CO₂ simplemente llegan por difusión a las células del cuerpo, unas veces porque están en contacto más o menos inmediato con el agua ambiente, y otras porque de ésta no las separa más que un fino tegumento (**respiración cutánea**). Como las células consumen oxígeno y producen dióxido de carbono, las tensiones de estos gases en las células son distintas que en el agua ambiente, en donde el oxígeno y el dióxido de carbono están disueltos en razón de sus proporciones relativas en el aire. Se establece así un **gradiente continuo** de la tensión de oxígeno desde el agua a las células, y de la de dióxido de carbono en sentido inverso, **gradiente que asegurará el intercambio de estos gases con el ambiente.**

RÉSPRACIÓN BRANQUIAL

A medida que crece el volumen y el espesor de los animales, los mecanismos físicos de difusión ya no son suficientes para asegurar el intercambio gaseoso, máxime teniendo en cuenta que este aumento de volumen suele ir acompañado de una mayor actividad y, por consiguiente, de un incremento del metabolismo que aumenta enormemente el trasiego de los gases. Surge entonces en los animales acuáticos una serie de mecanismos de muy variados orígenes y morfología, pero todos ellos con una función idéntica; dicha serie de mecanismos suele denominarse **branquias**; las branquias van a ser, en todos los animales acuáticos, los órganos especializados en el intercambio de los gases respiratorios con el exterior.



Branquias de un pez.



Branquias de un gusano tubícola.

Con la palabra branquia, sin embargo, se designan órganos tan distintos como las de los moluscos y las de los peces, y lo mismo se llaman branquias las pequeñas expansiones de los bordes de la boca del erizo de mar, como los magníficos plumeros branquiales de los gusanos tubicolos. Aún más: en ciertos animales, puede desempeñar el papel de branquia algún órgano especializado en otra función cualquiera, como sucede con los pies ambulacrales de la estrella de mar.

Todo esto quiere decir que la palabra branquia no tiene un sentido morfológico, sino funcional, y que se puede llamar branquia a todo órgano, más o menos laminar, que sumergido en el agua intercambie el oxígeno y el dióxido de carbono con el agua por un simple proceso de difusión física.

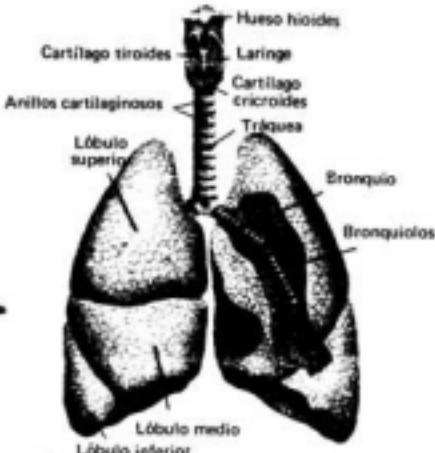
Como las branquias están localizadas en un determinado punto del cuerpo, queda aún sin resolver el problema del reparto del O₂ y la recogida del CO₂ desde las branquias a las células y viceversa, función ésta que compete al aparato circulatorio y que, como veremos, se ha resuelto de modos distintos.

RESPIRACION PULMONAR

En los animales aéreos se ha producido también la especialización de unos órganos encargados del transporte de los gases respiratorios, en este caso de las células a la atmósfera y viceversa. El problema se ha resuelto aquí de dos maneras muy distintas, que se denominan la **respiración pulmonar** y la **respiración traqueal**.



Abertura del orificio pulmonar en el caracol.



Los pulmones del hombre.

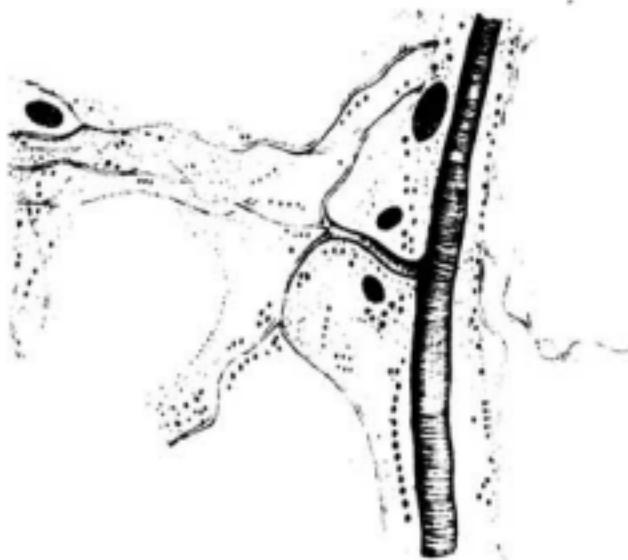
Igual que la palabra branquia, la palabra pulmón tiene solamente una significación funcional y significa solamente un saco en cuyo interior se verifica el intercambio de gases entre el animal y el aire atmosférico. La mayoría de las veces, como en los anfibios adultos, reptiles, aves y mamíferos, los pulmones son dos órganos simétricos dependientes de la parte anterior del aparato digestivo, pero en otros casos su origen es absolutamente distinto, como sucede en los caracoles terrestres, en que se trata de una cavidad en donde, en sus congéneres acuáticos, se alojan las branquias.

El mecanismo de la toma de oxígeno y la liberación del dióxido de carbono al nivel del pulmón, se realiza por un mecanismo físico idéntico al que sucede al nivel de la branquia.

La característica general de todos los pulmones es que su superficie interior siempre está cubierta por una ligera capa acuosa. (Razón por la cual la superficie pulmonar está hundida, pues si estuviera al exterior se secaría inmediatamente.)

En esta capa acuosa se disuelven los gases, que se difunden a las capas subyacentes o desde ellas en razón de sus respectivas tensiones parciales.

Por supuesto, lo mismo que en el caso de las branquias, el transporte de los gases a las células o desde las células es función del aparato circulatorio.



RESPIRACION TRAQUEAL

Ciertos grupos de artrópodos, entre ellos los insectos, han desarrollado un aparato respiratorio traqueal. Consiste éste en una serie de tubitos muy finos, reforzados por un hilo espiral de quitina, las tráqueas, que están en comunicación con el exterior por medio de unos orificios denominados estigmas.

Las tráqueas se ramifican en el interior del cuerpo del insecto con tal profusión que sus últimas ramificaciones, de un radio de 0,2 micras, rodean prácticamente a todas las células.

El aparato respiratorio traqueal está lleno de aire y éste, conducido por las tráqueas, lleva el oxígeno a cualquier punto del cuerpo, pasando luego a las células por simple difusión.

El dióxido de carbono se difunde también a las tráqueas, pero, dado el escaso volumen de la mayoría de los insectos, sale igualmente al exterior difundiéndose a través de los tegumentos.

LOS MOVIMIENTOS VENTILATORIOS

Ante los fenómenos respiratorios, los animales aéreos se encuentran en una situación distinta de los acuáticos, pues tienen que tomar directamente del aire el O₂ y expulsar directamente el CO₂ a la atmósfera. Ahora bien, aunque la tensión de oxígeno en el aire es igual a la que posee en el agua airtada, el animal aéreo tiene a su disposición mayor cantidad de oxígeno por unidad de volumen, lo que quiere decir que, suponiendo que sean iguales las reacciones metabólicas, el animal aéreo tardará más tiempo en consumir el oxígeno de un litro de aire que el acuático en consumir el oxígeno de un litro de agua y, por consiguiente, el animal acuático, a igualdad de condiciones, necesitará renovar el agua en contacto con sus branquias con mayor frecuencia que el aéreo el aire en contacto con sus pulmones.

En los animales pequeños con pulmones, pues, no hay movimientos de ventilación de la cavidad pulmonar, como sucede en el caracol terrestre, y tampoco los hay en los insectos pequeños. En ambos tipos, la **ventilación pasiva** de las cavidades llenas de aire y abiertas al exterior más o menos permanentemente basta para asegurar la provisión de oxígeno necesaria en las células; por el contrario, los animales acuáticos de tamaño análogo solamente pueden asegurar esta provisión mediante movimientos de renovación del agua alrededor de las branquias, unas veces moviendo éstas, como muchos gusanos y crustáceos, otras veces determinando una corriente de agua que pase por las branquias, como las almejas o los mejillones.

En los animales de mayor tamaño, cuyas necesidades de oxígeno son enormemente mayores que en los pequeños, los **movimientos ventilatorios** son obligados, tanto en los acuáticos como en los terrestres. Así, por ejemplo, los peces hacen pasar por sus branquias una fuerte corriente de agua, que asegura una adecuada tensión de oxígeno en el agua, constantemente renovada, que está en contacto con ellas. En cuanto a los animales terrestres con pulmones, en todos los vertebrados que los poseen se producen movimientos de **inspiración** y **espiración** que garantizan el suministro de oxígeno necesario. La excepción la constituyen en este caso muchos

anfibios adultos que en el invierno permanecen sumergidos y que no realizan movimientos ventilatorios; el caso se explica porque estos animales poseen, al lado de la respiración pulmonar (aparte de la respiración branquial que tuvieron sus larvas), una respiración cutánea tan intensa, que les permite prescindir durante ciertas épocas de su vida de la actividad de los pulmones.

Incluso en los insectos, con respiración traqueal, cuando alcanzan un tamaño relativamente grande, se hacen necesarios los movimientos ventilatorios. Estos se realizan de cuando en cuando por la contracción de algunos de los músculos del cuerpo, los cuales, al contraerse aplastan un determinado sector del árbol traqueal, de cuyas tráqueas sale expulsado el aire viciado; al recuperar su forma las tráqueas por cesar la contracción de aquellos músculos, y gracias a la elasticidad de su armazón quitinoso, entra aire fresco en las tráqueas correspondientes.

EL MEDIO INTERNO

En los animales con respiración traqueal o con respiración pulmonar, el intercambio de gases por simple difusión se establece solamente, como hemos dicho, al nivel de las branquias y de los pulmones, respectivamente. Queda, pues, un largo camino que el oxígeno y el dióxido de carbono han de recorrer hasta llegar a la intimidad de los tejidos, lugar de consumo y de producción, respectivamente, de estos gases.

Este camino exige la presencia de un medio de transporte, representado por el **medio interno**, que no se limita, como veremos, al transporte por el cuerpo de los gases respiratorios, sino al de otros materiales, como las sustancias alimenticias, los productos de desecho y las hormonas.

El medio interno de los animales es el líquido que baña las células del cuerpo, ocupando todos los intersticios entre ellas.

De él obtienen las células directamente los materiales alimenticios, y a él arrojan todos los materiales de desecho de la actividad celular, intercambiando también con él los gases respiratorios. Se encuentran, pues, las células con el medio interno en las mismas relaciones que los organismos unicelulares con el medio ambiente acuático en el que están su-

mergidos. El medio interno, además, es rico en sales inorgánicas, las cuales en conjunto le dan una presión osmótica adecuada para la vida de las células, actuando algunas de ellas (fosfatos y bicarbonatos) como tampones químicos que garantizan que no se experimenten grandes variaciones en el pH del referido medio interno.

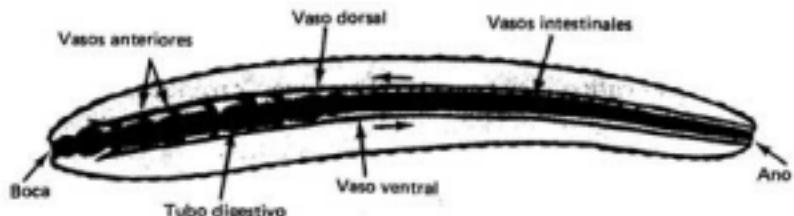
EL APARATO CIRCULATORIO

En los animales pluricelulares más sencillos y menos voluminosos, el medio interno intercambia sus materiales con el exterior por simple **difusión física**, ya que lo permite el poco trayecto a recorrer entre las células y el exterior.

A medida que los animales se van haciendo más complicados, el medio interno **se mueve**, a fin de llevar a los órganos correspondientes los materiales que transporta. Este movimiento es en los animales inferiores un simple flujo desordenado, concentrándose el medio interno en unas cavidades orgánicas más o menos grandes por las cuales se mueve, y entonces cabe ya distinguir entre el **plasma intersticial**, que es la porción de medio interno que resta entre las células, y los **humores orgánicos circulantes**, que constituyen las porciones que se mueven por las lagunas orgánicas.

En los animales más elevados en la escala zoológica, los humores **circulan ordenadamente** por el interior de unos conductos que constituyen en conjunto el denominado **aparato circulatorio**.

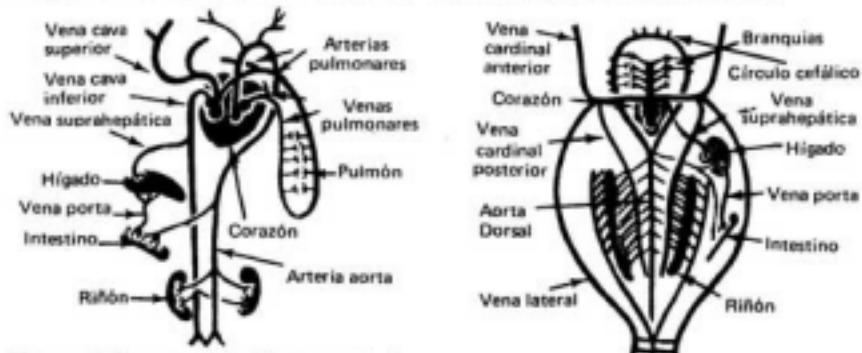
La circulación de los humores (que reciben el nombre de **sangre** en un sentido muy general, aunque sus características sean diferentes en los distintos animales) está determinada por una serie de causas distintas. En los equinodermos y en otros animales inferiores, la sangre se mueve gracias a la acción de unos **epitelios vibrátilles**. En los anélidos, la acción propulsora de la sangre está a cargo del **movimiento peristáltico** de los vasos **sanguíneos** mismos. En los artrópodos, moluscos y vertebrados, hay ya unos órganos especiales para esta propulsión, que se llaman **corazones** y que son unas masas musculares huecas con un sistema valvular, que funcionan a la manera de bombas aspirante-impelentes, cuyos compartimentos se dilatan (**diástole**) y se contraen (**sístole**) alternativamente, obligando a la sangre a circular en un solo sentido.



Esquema del aparato circulatorio de un anélido (lombriz de tierra).

Desde otro punto de vista, existen dos tipos de aparatos circulatorios, los **aparatos circulatorios abiertos** y los **aparatos circulatorios cerrados**. En los primeros, la sangre fluye en parte por el interior de unos vasos, y en parte se extiende entre los tejidos por unas **lagunas orgánicas**, con las cuales comunican los vasos. En los aparatos circulatorios cerrados, la sangre está siempre contenida en los vasos, y solamente en los más finos de ellos (los **capilares sanguíneos**) rezuma el plasma sanguíneo, que está así en continuidad con los tejidos.

En la mayoría de los aparatos circulatorios hay unos vasos sanguíneos en relación con los órganos respiratorios, de manera que se favorece el paso de la sangre por ellos, a fin de que se haga más fácilmente el intercambio de los gases de la respiración, con la salida del CO₂ y la incorporación del O₂ (**hematosis**). En el aparato circulatorio de los vertebrados superiores, estas relaciones entre ambos aparatos se hace más eficaz, hasta el punto de que en los mamíferos, por ejemplo, existe una sección del aparato circulatorio, la **circulación menor**, dedicada exclusivamente a favorecer la hematosis.



Representación esquemática del aparato circulatorio de un mamífero: circulación doble y completa.

(Para mayor sencillez del dibujo, no se ha representado más que un pulmón).

Representación esquemática del aparato circulatorio de un pez: circulación sencilla y completa.

FUNCIONES DE LA SANGRE EN LOS VERTEBRADOS

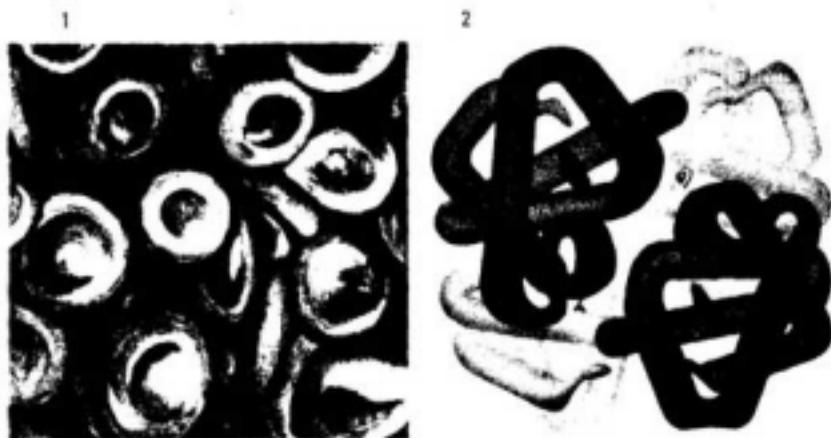
En los vertebrados existen dos humores circulantes, la **linfa** y la **sangre**. Sin embargo, esta distinción, que es clara desde el punto de vista descriptivo, no lo es tanto desde el punto de vista funcional, pues la linfa tiene a su cargo algunas de las misiones de la sangre, y al final la circulación linfática se incorpora a la circulación sanguínea.

La **sangre** de los vertebrados es un líquido con una serie de misiones muy variadas: es el **medio nutritivo** que lleva a las células los elementos alimenticios, el **medio evacuador** de sus materiales de desecho, el **vehículo de las hormonas** o sustancias de correlación orgánica, cuya misión estudiaremos más adelante, y, por último, el **vehículo de las sustancias defensoras de su inmunidad** (los **anticuerpos**, de los que también se hablará más tarde) y de las **células que defienden el organismo** cuando éste sufre una infección (los **glóbulos blancos**).

Por ahora nos interesa examinar brevemente cómo cumple la misión de servir de intermediario entre las células y el aparato respiratorio para llevar a cabo el intercambio de los gases respiratorios.

BIOQUIMICA DEL INTERCAMBIO DE LOS GASES RESPIRATORIOS

En la sangre de muchos animales hay unas células especiales adaptadas al transporte de los gases respiratorios del aparato respiratorio a los tejidos y viceversa. Estas células, llamadas de ordinario glóbulos, son muy variadas; en unos casos tienen núcleo y en otros son anucleadas, pero todas ellas tienen una característica común: la presencia en su citoplasma de un **pigmento transportador**, coloreado y formado de una complicada molécula orgánica, que siempre tiene un **metal** en su composición. La mayor parte de los pigmentos transportadores de la sangre contienen **hierro**, pero hay algunos que contienen **cobre**. Tan importantes para el transporte de los gases de la respiración son estos pigmentos, que a veces se encuentran disueltos en la sangre y no en glóbulos, pero no faltan nunca en los animales superiores.



1. Glóbulos rojos, a gran aumento, con el microscopio electrónico de "scanning".
 2. Molécula de hemoglobina.

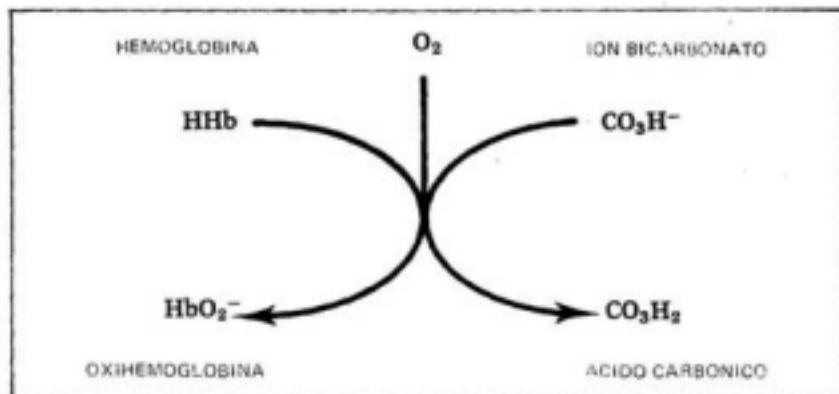
El pigmento transportador de algunos anélidos se llama **hemeritrina**, es de color rojo y posee **hierro**; pero otros anélidos tienen un pigmento verde, también con **hierro**, la **clorocruorina**. Ciertos moluscos tienen un pigmento con **cobre**, de color azul, la **hemocianina**. Sin embargo, el pigmento transportador más difundido es la **hemoglobina**, que es un heteroproteído, compuesto por una proteína y un grupo prostético tetrapirrólico (parecido a la molécula de clorofila), entre cuyos grupos pirrol posee un átomo de **hierro**. La hemoglobina se encuentra en los glóbulos rojos de la sangre de todos los vertebrados y disuelta en el plasma de ciertos anélidos y moluscos.

La **hemoglobina** tiene una gran afinidad por el oxígeno, y por esta razón, al llegar los glóbulos rojos al pulmón, se combina con el oxígeno, formando un compuesto llamado **oxihemoglobina**. Este compuesto es inestable y en los tejidos se descompone, dando oxígeno, que va a las células, y hemoglobina reducida, la cual queda dispuesta para el transporte de más oxígeno.

Las condiciones en que se realiza este transporte son las siguientes:

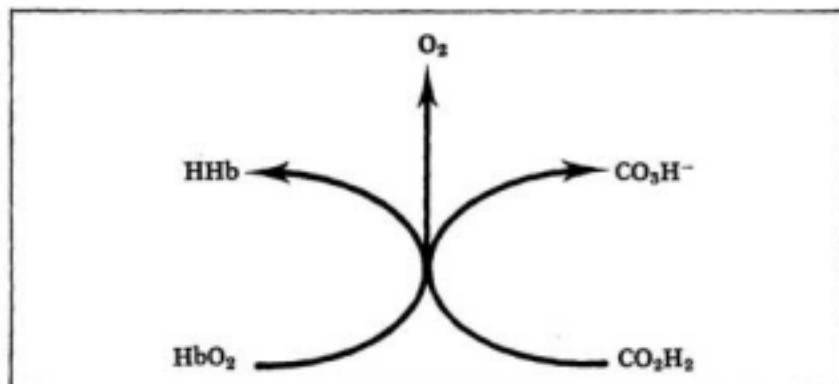
En los glóbulos rojos, la reacción de **oxidación** de la **hemoglobina** está acoplada con una reacción de **reducción** del **ión**

bicarbonato, disuelto en el citoplasma del mismo glóbulo rojo, que convierte a dicho ión en ácido carbónico, al par que la hemoglobina reducida pasa a oxihemoglobina cargada negativamente:

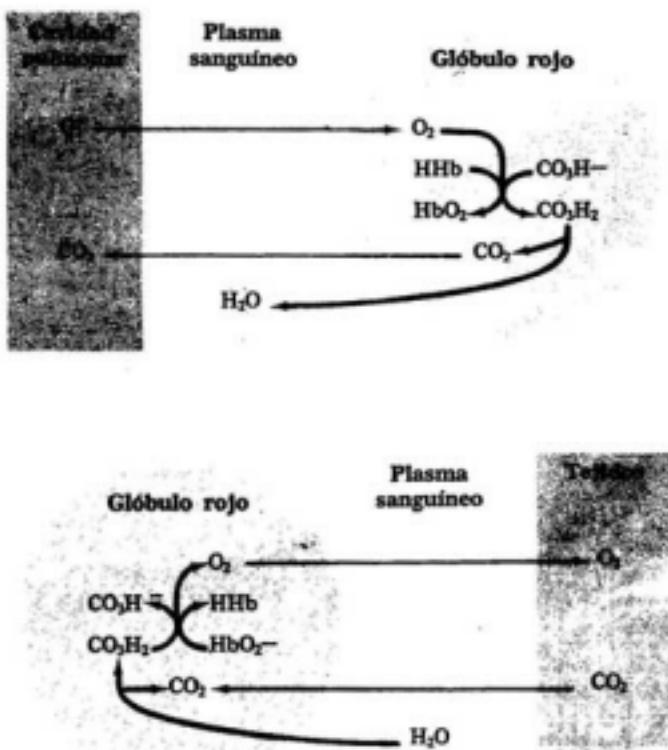


A continuación, el ácido carbónico, en una reacción catalizada por la enzima **carbónico anhídrasa** se descompone en agua y CO_2 , el cual queda libre y pasa inmediatamente al alvéolo pulmonar.

En los tejidos, las reacciones son inversas. El CO_2 producido por las células entra en el glóbulo rojo y se une con agua para formar ácido carbónico. Este se oxida a ión bicarbonato, reacción que se acopla con la **reducción de la oxihemoglobina** y la liberación del oxígeno, que pasa a las células:



El esquema siguiente resume el conjunto de estas reacciones en el pulmón y en los tejidos.



Hay que advertir, además, que en el intercambio de gases interviene también el paso a través de la membrana del glóbulo rojo de los iones de bicarbonato, lo cual se hace mediante un intercambio con los iones de sodio y de potasio que entran en el sistema.



LA EXCRECION Y LOS TEGUMENTOS

Las sustancias producidas en el catabolismo celular son con frecuencia no ya inútiles, sino incluso perjudiciales para las células mismas, por lo que se les asigna la denominación de sustancias de desecho.

Es evidente que el organismo necesita deshacerse de ellas, eliminarlas, expulsándolas al exterior del cuerpo, es decir, excretándolas; de esta misión se encargan varios órganos de los animales: el hígado, que elimina la colesterina y otras sustancias, el aparato respiratorio, por medio del cual sale al exterior la mayor parte del dióxido de carbono, etc. Sin embargo, existen dos aparatos especializados en la función excretora, a saber, el denominado precisamente aparato excretor y los tegumentos, una de cuyas funciones, aunque no la única, es la de eliminar sustancias de desecho.

LAS FUNCIONES DE LOS APARATOS EXCRETORES EN LOS ANIMALES

Aunque, por supuesto, la principal misión de un **aparato excretor** en el organismo animal es la de liberar al organismo de los productos perjudiciales del propio metabolismo celular, cualquier tipo de aparato excretor tiene, además, otras importantes funciones, como son la **regulación del agua** en el interior del organismo y la de los **iones y sales inorgánicas** disueltas en el medio interno, o, lo que es lo mismo, la **regulación de la presión osmótica** de dicho medio interno, ya que ésta depende tanto del volumen de agua en el organismo, como de la cantidad y naturaleza de las sales y de los iones disueltos.

Unos experimentos sencillos hacen bien aparente este papel de los órganos excretores en la regulación de la presión osmótica en el medio interno. Si ligamos a una rana el **pedúnculo renal**, de ambos riñones, es decir, el conjunto del uréter y de los vasos que riegan el riñón, con lo que hemos dejado a la rana funcionalmente sin riñones, observaremos que la rana, abandonada en el agua, muere al cabo de pocas horas completamente hinchada. La muerte del animal no se ha producido por la falta de eliminación de sustancias tóxicas, pues éstas tardan bastante más tiempo en ejercer su acción perjudicial, sino porque, siendo la presión osmótica del medio interno superior a la del agua, en la rana ingresa agua constantemente a través de los tegumentos; en condiciones normales, el riñón de la rana elimina este exceso de agua y la cantidad de este líquido presente en los tejidos no varía, pero al estar ligado el riñón, la corriente de agua que ingresa incessantemente a través de la piel no tiene su contrapartida en la excreción renal y el agua se acumula en los tejidos en grandes cantidades, rebajando además notablemente la presión osmótica del medio interno, siendo ambas circunstancias las determinantes de la rápida muerte de la rana.

Igual experimento, con idénticos resultados y por idénticas razones podemos hacer con un cangrejo de río al que se le liguen o extirpen las **glándulas verdes** o **glándulas antenales**, situadas en el cefalotórax en la base de las antenas y que constituyen el aparato excretor de estos animales.

En los animales marinos también existen mecanismos de regulación de la presión osmótica del medio interno, pero aquí lo

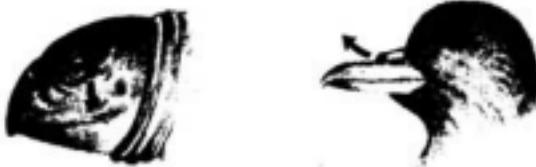


Cangrejo de río, mostrando los orificios excretores de las glándulas verdes.

que se elimina es el exceso de sales, función que está a cargo de unas glándulas especiales secretoras de cloruro sódico, situadas en los ojos de las tortugas de mar o en las narices de aves marinas, o bien a cargo de las branquias, como ocurre en los teleósteos de agua salada, que también eliminan así las sales en exceso que han sido adquiridas a través del tubo digestivo.

LOS DIVERSOS TIPOS DE APARATOS EXCRETORES EN LOS ANIMALES

El más sencillo tipo de aparato excretor lo encontramos en los protozoos. Muchos rizópodos, flagelados y ciliados de agua dulce, están dotados de una diminuta vesícula denominada vacuola contráctil o vacuola pulsátil, debido a su capacidad de contraerse a intervalos periódicos y expulsar su contenido al exterior; la vacuola contráctil está también presente en casi todos los ciliados marinos y parásitos.



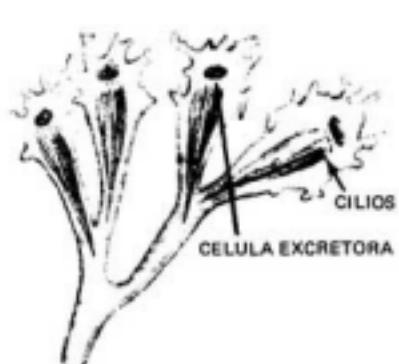
Glándulas secretoras de cloruro sódico en tortuga y ave marina.

Pues bien, las vacuolas contráctiles se consideran como unos orgánulos de regulación osmótica y, por consiguiente, orgánulos excretores, que se sabe que están en relación con el retículo endoplasmático celular, por cuyas cavidades discurre el líquido que la vacuola excretará después. Sin embargo, se sabe poco acerca de los mecanismos fisiológicos que rigen la osmorregulación a este nivel celular, pues el hecho de que posean vacuolas contráctiles tanto los ciliados de agua dulce como los marinos, hace pensar que el mismo orgánulo puede tener en ambos casos un funcionamiento muy distinto.

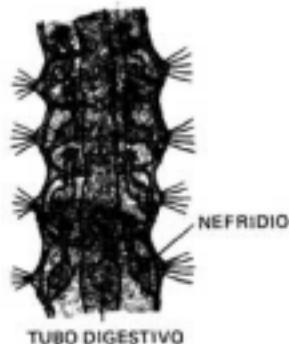
En los invertebrados más inferiores, como esponjas y celentéreos, no hay un aparato excretor diferenciado, realizándose la excreción a través de las membranas celulares, ya que todas las células están prácticamente en contacto con el medio ambiente.

En los demás invertebrados se forman ya unos órganos excretores, todos ellos tubulares, que se pueden dividir en tres tipos:

a) Los **protonefrídios**, túbulos terminados por un lado en un poro excretor y por el otro cerrados por una célula dotada de un mechón de cilios que se bañan en el contenido del túbulo: el líquido excretado se filtra a través de las paredes del protonefridio y es expulsado hacia el poro excretor por los movimientos de los cilios de la célula terminal. Hay protonefrídios en los rotíferos, en las larvas de los anélidos y moluscos, etc.

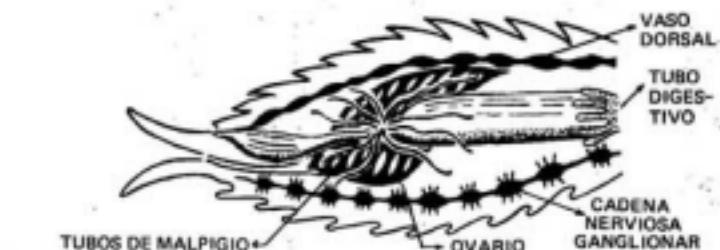


Protonefridio de un rotífero.



Esquema de un fragmento de anelido, mostrando un par de nefridios en cada segmento.

b) Los nefridios, túbulos más o menos largos y sinuosos que desembocan al exterior por un poro excretor y que por el otro extremo se abren en el celoma por medio de un embudo de bordes ciliados. El líquido de excreción entra por el embudo y se concentra en los nefridios antes de salir al exterior. Es el caso de los anélidos y los moluscos.



Porción de abdomen de un insecto, mostrando los tubos de Malpighio.

c) Los tubos de Malpighio, túbulos en fondo de saco que desembocan en el intestino, arrojando a él los productos de excreción que se han filtrado a partir del celoma. Estos son los órganos excretores de los insectos.

EL RIÑON DE LOS VERTEBRADOS

En los vertebrados, los órganos excretores por excelencia son los riñones, órganos pares situados a ambos lados de la columna vertebral y que se componen sustancialmente de una multitud de tubos que forman una unidad funcional, con un conducto evacuador único, el uréter, y unos dispositivos anatómicos en relación con el aparato reproductor para la expulsión final de la orina.

Los túbulos uriníferos son los órganos activos en la excreción, y cada uno de ellos es una unidad fisiológica que se denomina nefrona. Esquemáticamente, una nefrona está formada por varios segmentos, que se disponen sucesivamente a lo largo del túbulo.

El túbulo está ensanchado en su extremo en forma de una ampolleta cuyo centro está deprimido, de manera que da origen a una cavidad en forma de copa, cuya pared es doble, formando una oquedad que se continúa con la oquedad del túbulo. A ésta

parte se la conoce con el nombre de cápsula de Bowman. Esta cápsula o embudo rodea a un pelotón de vasos sanguíneos, que forman con la cápsula de Bowman el llamado glomérulo.



Fotografía de un riñón, en donde se ha señalado el trayecto de una nefrona.



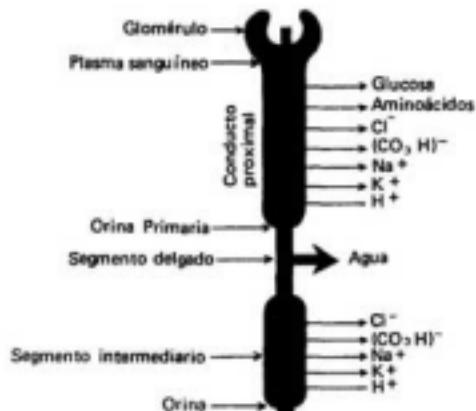
Esquema de una nefrona.

A continuación viene una porción ancha del túbulo, el **conducto proximal**, que se continúa con una porción de un calibre mucho menor, el **segmento delgado**, que en los mamíferos está doblado en forma de U, por lo que se le denomina **asa de Henle**.

Se encuentra después una parte de nuevo más ancha, el **segmento intermediario** o **segmento distal**, el cual termina en un conducto que se unirá a los conductos similares de otros túbulos para reunirse en un **conducto evacuador** común. Cada grupo de nefronas se evacua separadamente en la pelvis del riñón, en donde se reúne la orina producida por cada uno de los túbulos de cada riñón, que se canaliza al exterior por el correspondiente **uréter**.

FORMACION DE LA ORINA EN EL RIÑON DE LOS MAMIFEROS

Aunque los fenómenos de filtración que tienen su asiento en la nefrona son realmente muy importantes, la formación de la orina es un proceso más complicado, en el cual intervienen otros fenómenos de variada índole. Daremos una visión general de lo que sucede en los mamíferos, ya que en éstos el proceso es más conocido que en otros grupos.



Esquema de los fenómenos que suceden en los distintos tramos de la nefrona durante la elaboración de la orina.

El primer fenómeno que sucede en el glomérulo es la filtración del plasma sanguíneo. Los vasos sanguíneos que se apelotonan en la cavidad de la cápsula de Bowman tienen en conjunto una superficie muy grande, que se calcula en más de un metro cuadrado en el hombre. La sangre que pasa por ellos está a una presión hidrostática muy superior a la que existe en el interior del túbulo urinífero y esta diferencia de presión fuerza a pasar a través de las paredes de los vasos y de la pared interna de la cápsula al plasma sanguíneo, que se filtra así hacia el interior del referido túbulo. La presión hidrostática de la sangre tiene también que vencer a la presión osmótica del plasma sanguíneo, que es mayor que la del plasma filtrado porque a este líquido no pasa el plasma total, sino el agua con las moléculas de menor tamaño, quedando en el interior de la sangre las proteínas plasmáticas.

El filtrado en el glomérulo tiene como consecuencia el paso a la luz del túbulo urinífero de una enorme cantidad de plasma sanguíneo parcial, que se calcula en unos 180 litros por día en el hombre.

Ahora bien, en los siguientes segmentos del túbulo urinífero sucede una serie de reabsorciones y de excreciones que, por un lado, reducen la enorme cantidad del líquido filtrado en el glomérulo, y, por otro, modifican su composición química para dar la de la orina definitiva, de tal modo que se puede hablar con propiedad de una **elaboración de la orina** en los siguientes segmentos del túbulo.

A fin de poder realizar estos nuevos intercambios con la sangre a nivel de estos segmentos, existe una red de capilares sanguíneos que los rodea estrechamente, la cual es tan abundante que hace posible que los riñones contengan aproximadamente una cuarta parte de la sangre circulante.

En el **conducto proximal** se realiza una **reabsorción selectiva** del filtrado glomerular, mediante la cual recupera la sangre los productos que tienen utilidad para el organismo, como la glucosa, los aminoácidos, los iones Cl^- , Na^+ , K^+ y $(\text{CO}_3\text{H})^-$, etc. A consecuencia de esta reabsorción queda un líquido que se llama **orina primaria**.

En el **segmento delgado**, o asa de Henle, se verifica la **absorción de una cantidad muy grande de agua**, con la correspondiente concentración de la orina primaria.

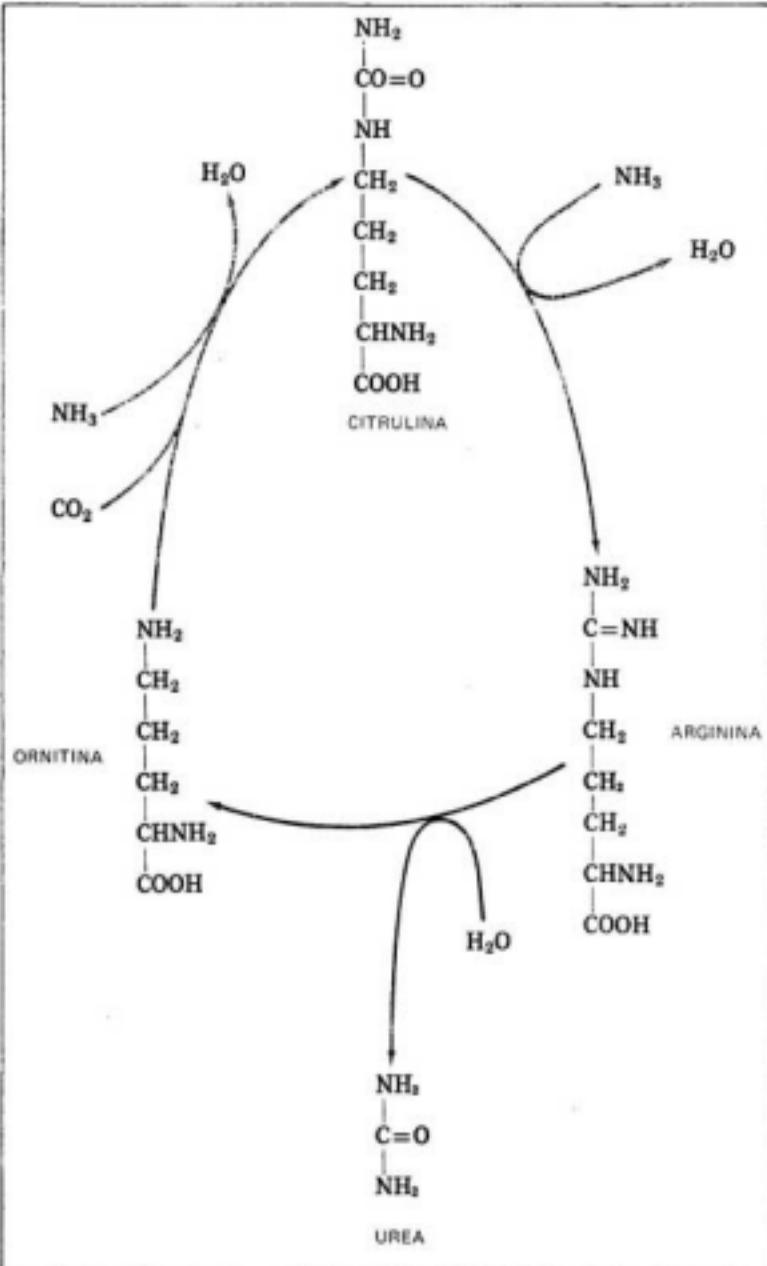
Por último, en el **segmento intermediario**, o segmento distal, se completa la **absorción de los mismos iones inorgánicos** que en el conducto proximal, quedando ya la orina con su composición definitiva.

Es interesante hacer constar que en los conductos proximal y distal existe un **mecanismo fisiológico activo** para el transporte a través de la membrana de los iones Na^+ y K^+ , con un intercambio con el ión H^+ , lo que contribuye a acidificar la orina, aunque la acidez de este líquido depende en gran medida del régimen alimenticio del animal.

LA UREA

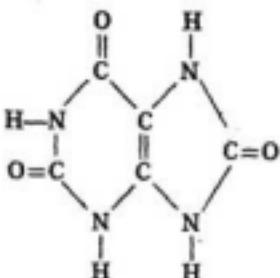
En los mamíferos, el principal producto de excreción contenido en la orina es la urea, que se forma en el hígado a expensas del aminoácido arginina, dando ornitina; la ornitina reacciona ahora con CO_2 y NH_3 convirtiéndose en citrulina, la cual, mediante una nueva combinación con NH_3 pasa de nuevo a arginina.

Este mecanismo bioquímico, por el cual se elimina el NH_3 procedente de la desaminación de los aminoácidos en el catabolismo celular, y en el cual se regeneran siempre los tres aminoácidos implicados, con la constante formación de urea, se llama **el ciclo de la urea**:



En otros animales, como en los reptiles y en las aves, el principal producto nitrogenado de excreción es el **ácido úrico**, que es una purina que se origina en el organismo por otros mecanismos bioquímicos.

Como el ácido úrico es muy poco soluble en agua, en los animales eliminadores de este producto la orina es muy pobre en agua, ya que el agua de la orina desempeña en los mamíferos el papel primordial de ser vehículo de la urea, que es muy soluble.



ACIDO URICO

LOS TEGUMENTOS DE LOS ANIMALES

Los tegumentos son la barrera o frontera que separa al cuerpo de los animales del medio ambiente que les rodea. No son, sin embargo, simplemente barreras mecánicas, sino que desempeñan también funciones muy importantes para la vida del animal.

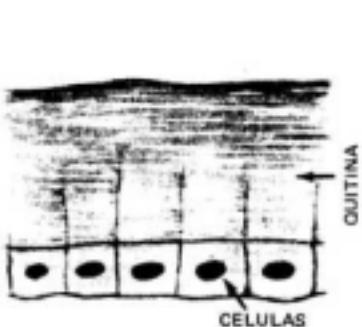
La mayoría de los tegumentos son en su totalidad derivados del ectodermo y constituidos por tejido epitelial. De acuerdo con esta naturaleza histológica tienen unas células unidas entre sí estrechamente para proteger a los tejidos subyacentes y unas células secretoras, que producen sustancias de diverso significado fisiológico. Estas células secretoras pueden organizarse en verdaderas glándulas, cuyo papel es a veces de la más alta importancia.

LOS TEGUMENTOS EN LOS INVERTEBRADOS

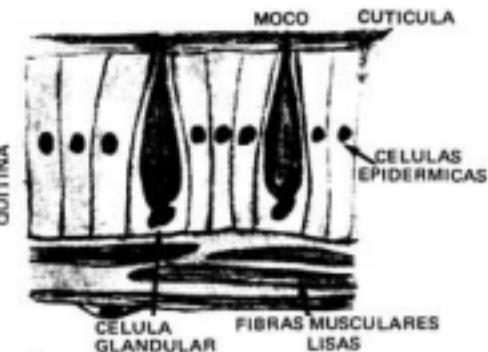
El tegumento de los animales invertebrados suele estar constituido por un **epitelio monoestratificado**, de una sola capa de células cúbicas, que recibe el nombre de **epidermis**.

En ciertos casos, las células de este epitelio son **ciliadas**, como sucede ordinariamente en los turbelarios, de manera que la epidermis sirve al mismo tiempo de protección y de órgano del movimiento.

En otros casos, la protección mecánica que brinda la epidermis se hace más eficaz porque todas las células epidérmicas segregan una sustancia que se endurece, quedando así el cuerpo cubierto de una **cutícula** muy resistente. Esto lo podemos observar en los artrópodos, cuya epidermis segregá una sustancia nitrogenada, la **quitina**, que forma una verdadera coraza o exoesqueleto, sobre todo, como es el caso de muchos crustáceos, cuando se impregna de sales calizas que le confieren unas singulares tenacidad y dureza.



Epidermis de artrópodo, que da origen a una cubierta de quitina.



Epidermis de lombriz de tierra, que derrama un moco protector sobre ella.

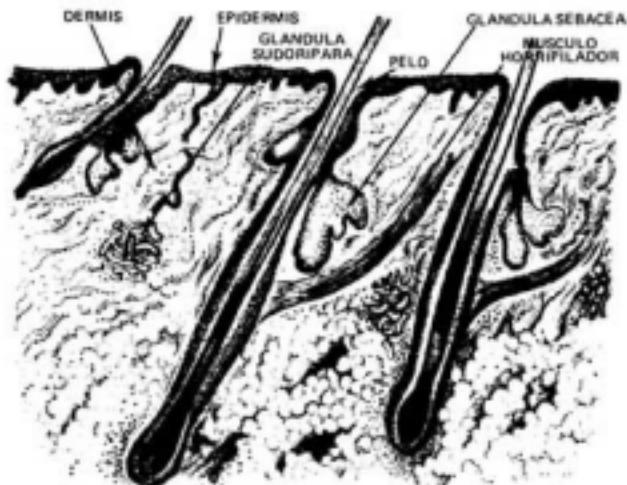
En otros casos, en fin, además de poseer una cutícula de naturaleza quitinoide, la epidermis está dotada de unas numerosísimas **células glandulares** que segregan un moco que facilita el deslizamiento del animal, como sucede en el caso de las lombrices de tierra.

Un caso notable de especialización del epitelio epidérmico en los invertebrados es el de los moluscos, cuyo tegumento se repliega en gran parte de su cuerpo formando el **manto**. La parte externa del manto está formada por células epidérmicas que segregan la pieza esquelética denominada **concha**; mientras que la cara interna está formada por células epiteliales no secretoras que pueden ser ciliadas, como en los lamelibranquios.

LOS TEGUMENTOS EN LOS VERTEBRADOS

A diferencia de los invertebrados, que muestran, como hemos visto, una gran variedad en sus tegumentos, los vertebrados ostentan una uniformidad fundamental a este respecto.

Los tegumentos de los vertebrados son unos órganos complejos, constituidos siempre por dos capas de naturaleza histológica y embrionológica distinta, la **dermis** y la **epidermis**. El conjunto de dermis y epidermis es la **piel**.



Corte de piel humana.

La dermis es una capa procedente del **mesodermo**. Está formada principalmente por tejido conjuntivo, pero en ella hay también zonas de tejido adiposo, haces de fibras musculares, terminaciones nerviosas y vasos sanguíneos, además de las glándulas que se forman a expensas de la epidermis y que aparecen hundidas en plena dermis.

La epidermis, separada por una membrana de la dermis subyacente, procede del **ectodermo** y está formada exclusivamente por tejido epitelial, en el cual a veces se insinúan algunas terminaciones nerviosas. El epitelio que forma la epidermis es un **epitelio pluristratificado**, cuyas células, en continua proliferación a expensas de su capa inferior o capa basal, se renuevan constantemente, siendo sustituidas por las más jóvenes.

La epidermis de los vertebrados tiene también una singularidad de tipo bioquímico a la que debe muchas de sus propiedades: la capacidad de sus células de sintetizar queratina. Efectivamente, esta escleroproteína rica en azufre forma enteramente las capas externas de la epidermis a medida que sus células van enriqueciéndose en esta sustancia, y además forma los derivados de la piel llamados fáneras, que son tan característicos de los tegumentos de los distintos grupos de vertebrados y que tan importante papel desempeñan en ellos: los pelos, las uñas, las astas, las pezuñas, las plumas, las escamas, los picos, etcétera.

FUNCIONES DE LA PIEL EN LOS VERTEBRADOS

La piel en los vertebrados, como los diversos tegumentos de los invertebrados, es un órgano que puede desempeñar muchas y distintas funciones. Veremos algunas de ellas.

a) **Protección mecánica.** Toda la epidermis desempeña este papel, especialmente en los casos en que es notablemente gruesa, como en las plantas de los pies de los hombres, o en toda su superficie en algunos animales. Pero singularmente, esta misión la desempeñan perfectamente algunas de las fáneras como los pelos de los erizos y de los puerco-espines y las escamas de los reptiles o de las patas de las aves. Incluso, en este aspecto, se pueden considerar algunas producciones epidérmicas, como los cuernos, las garras o los picos de las aves rapaces, aunque hay que hacer constar que algunos de éstos son verdaderos órganos a cuya formación colabora la dermis e incluso los tejidos adyacentes.

b) **Defensa contra la desecación.** La impermeabilidad de la queratina garantiza esta defensa, por lo menos en condiciones de sequedad no muy acusada. Los animales de lugares más áridos se protegen contra este peligro con la posesión de escamas, como generalmente sucede con los reptiles.

c) **Defensa contra los cambios de temperatura.** Los vertebrados homeotermos (aves y mamíferos) han de proteger a sus células contra los cambios de temperatura excesivos, que po-

drían tener consecuencias irreparables para su metabolismo. Pues bien, la piel es uno de los órganos encargados de intervenir en la regulación de la temperatura, aunque la parte principal en esta regulación corre a cargo del sistema nervioso.



Los músculos horripiladores de la piel levantan el pelo, protegiendo así al cuerpo contra el frío.

Cuando sobreviene un frío excesivo, sobreviene una constrección de los vasos sanguíneos de la dermis, circulando menor cantidad de sangre y reduciéndose así la irradiación de calor al exterior; los músculos lisos que se insertan en cada uno de los pelos (músculo horripilador) se contraen y los pelos «se ponen de punta», manteniendo de este modo entre ellos una capa de aire que aísla al organismo y colabora también a disminuir la irradiación calorífica.

Por el contrario, cuando en el exterior hace una temperatura elevada se produce una vasodilatación, con una mayor irradiación, y además las glándulas sudoríparas producen abundante sudor que, al evaporarse, resta calor a la piel.

d) **Función excretora.** Las glándulas sudoríparas no son solamente parte de un mecanismo contra la alta temperatura ambiente, ya que en el sudor existen materiales de excreción típicos, como la urea. A este respecto, pues, la piel es un auténtico órgano de excreción, que se encarga de eliminar parte de los productos de desecho, lo mismo que los riñones. Hay que añadir que por la piel se eliminan también grandes cantidades de vapor de agua y de CO₂, que, en cierto modo, son también igualmente productos de excreción.

e) **Función respiratoria.** En algunos vertebrados, como en los anfibios, la piel desempeña un importantísimo papel como órgano respiratorio. Estos animales poseen incluso unos vasos sanguíneos especiales que bañan la piel llevando la sangre cargada de dióxido de carbono y recogiendo la sangre oxigenada, y se ha demostrado que en ciertas circunstancias este tipo de respiración cutánea tiene una mayor importancia cuantitativa que la respiración pulmonar.

f) **La piel, órgano de la sensibilidad.** La piel propiamente dicha es el órgano en que radican la sensibilidad térmica y la sensibilidad táctil, para cuyo fin posee unos receptores específicos variados. Sin embargo, como todos los órganos de los sentidos se encuentran en la periferia, se puede decir que la piel interviene, por lo menos como órgano coadyuvante, en todos los fenómenos que tienen como resultado el poner al animal en contacto con el mundo que le rodea, de una manera consciente o inconsciente.



LA COORDINACION ORGANICA

El organismo animal funciona, como hemos visto, en virtud del funcionamiento de los órganos, aparatos y sistemas, el cual se basa, al propio tiempo, en una estructura de los mismos, de tal manera que se podría creer que el funcionamiento general del organismo es simplemente el resultado de la suma de las actividades de cada una de sus partes.

Sin embargo, en cada organismo animal se puede observar que los distintos órganos no funcionan siempre con la misma intensidad ni de la misma forma, sino que su funcionamiento está regulado de acuerdo con las actividades de los demás, de modo que el resultado es el funcionamiento armónico del organismo en su conjunto.

Esta regulación exige unas relaciones especiales entre unos órganos y otros, las cuales constituyen un sistema de información y control que asegura la colaboración entre las distintas partes del organismo. Dichas relaciones fisiológicas que aseguran la coordinación funcional orgánica, corren a cargo de dos mecanismos distintos, el sistema nervioso y el sistema hormonal.

Del primero de ellos trataremos en este capítulo.

Santiago Ramón y Cajal (1852-1934), fue uno de los más sabios investigadores sobre el sistema nervioso. Esta fotografía se la hizo él mismo con un procedimiento original de fotografía en color, en los ábores de esta técnica.

RECEPTORES Y EFECTORES

Los animales se mueven en busca de comida, de humedad, de individuos de otro sexo para aparearse, etc., y también para huir de circunstancias adversas, como excesivos calor o frío, traumatismos, etc. El movimiento, en todo caso, lo realiza el cuerpo mediante unos **movimientos coordinados** ejecutados por el aparato locomotor, que coloca al cuerpo en la posición y postura favorables para la realización de sus fines.

Al mismo tiempo, los diversos órganos del animal realizan igualmente unos **movimientos coordinados** para el desarrollo de las funciones orgánicas, como la masticación y la deglución, los movimientos intestinales, etc., o unas actividades celulares apropiadas para dichas funciones, como las secreciones de las glándulas.

Para que se realicen todo tipo de movimientos coordinados se precisa que el animal obtenga una **información apropiada** sobre las condiciones en que se encuentra su ambiente (luz, temperatura, composición química del medio ambiente), sobre las alteraciones de estas condiciones y sobre el estado de su propio cuerpo. Estas informaciones se obtienen a través de unos órganos llamados **receptores**.

El conjunto de músculos y glándulas que ejecutan las correspondientes respuestas son los órganos **efectores**.

Pues bien, entre los órganos receptores y los efectores, el **sistema nervioso** es el encargado de elaborar la información aportada por los primeros y enviarla a los segundos.

- RECEPCION DE LOS ESTIMULOS

En los animales, los receptores de los estímulos son unas células específicas, denominadas **células sensoriales**, que pueden estar aisladas o agrupadas entre sí y con otras células para formar órganos complejos destinados a la percepción de los cambios ambientales.

Los receptores pueden ser sensibles a la luz (órganos visuales), a la composición química del medio ambiente (órganos del olfato y del gusto), a los cambios o a las propiedades mecánicas de los objetos (órganos de la audición y de la

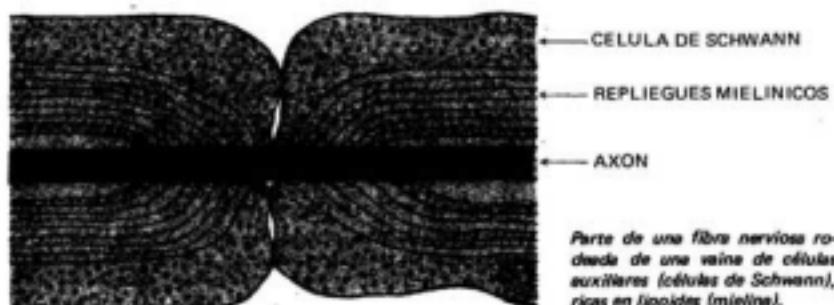
sensibilidad táctil) o a los cambios de temperatura (órganos de la sensibilidad térmica).

La mayor parte de las veces las células sensoriales de los órganos receptores son células nerviosas, diferenciadas para la percepción de un determinado estímulo, pero el fenómeno de la sensibilidad suele tener una semejanza fundamental en todas ellas.

La célula sensorial (al igual que la fibra nerviosa, como veremos) tiene a un lado y a otro de su membrana un distinto potencial eléctrico, diferencia de potencial que se denomina potencial de reposo y que se traduce en una carga negativa en el interior de la membrana con respecto al exterior de la misma. En el momento en que el estímulo incide sobre la superficie de la membrana se produce una rapidísima despolarización en el punto afectado, cambiando de signo localmente el potencial de reposo. Esta despolarización se transmite en forma de onda por la membrana, en la dirección del axón de la célula nerviosa, restableciéndose inmediatamente el referido potencial de reposo.

LAS FIBRAS NERVIOSAS

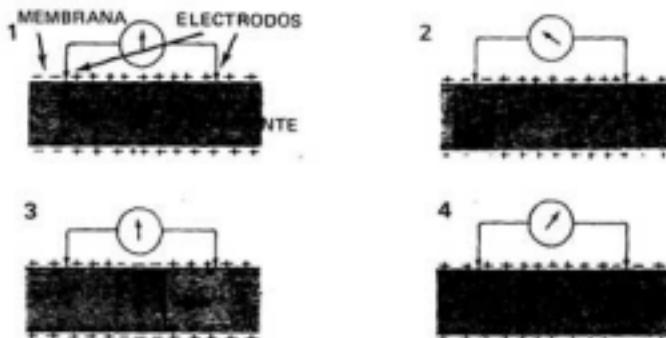
En algunos invertebrados, como los celentéreos, existen unas redes nerviosas indiferenciadas que transmiten las excitaciones a todo el cuerpo o, por lo menos, a todas las regiones del cuerpo surcado por estas redes, pero en los demás animales, especialmente en los vertebrados, la corriente nerviosa se dirige de unos puntos a otros a lo largo de las fibras nerviosas, que están constituidas por los axones de las neuronas, rodeados por unas células auxiliares de muy diversos tipos.



La naturaleza de la corriente nerviosa (**corriente de acción**) se conoce hoy, sobre todo, gracias a los experimentos realizados en ciertas fibras nerviosas excepcionalmente grandes, existentes en los calamares. El gran diámetro de estas **fibras gigantes** ha permitido la implantación de microelectrodos en el interior del axón, lo que ha hecho posible la medición del potencial eléctrico a ambos lados de la membrana, así como el conocimiento de los fenómenos iónicos que suceden en el axón.

Cuando se introduce un microelectrodo en el interior del axón y se mide la diferencia de potencial a través de la membrana, se puede observar que existe un **potencial de reposo** de unos 70 mV, siendo negativo el interior con respecto al exterior de la membrana, al igual que sucede en las células sensoriales. Este potencial de reposo se debe a la distinta **concentración iónica** a ambos lados de la membrana, la cual a su vez tiene dos causas.

En primer lugar, existe un **mecanismo fisiológico**, denominado **bomba de sodio**, mediante el cual se hacen pasar a través de la membrana iones Na^+ hacia fuera de la célula e iones K^+ hacia dentro de ella. Este transporte resulta de la actividad de la membrana, implicando un **gasto de energía** en forma de ATP. En segundo término, existe una **difusión pasiva** de dichos iones a través de la membrana, cuya intensidad depende para los distintos iones de la **diferente permeabilidad** de la membrana frente a cada uno de ellos, siendo ésta muy per-



Polarización de la fibra nerviosa. En una fibra nerviosa gigante de calamar se han implantado dos electrodos, entre los cuales un galvánometro señala una diferencia de potencial. El galvánometro permite apreciar los cambios sucesivos en la carga de la membrana, que se traducen en una corriente de acción.

meable para el K^+ y muy poco para el Na^+ , en condiciones de reposo.

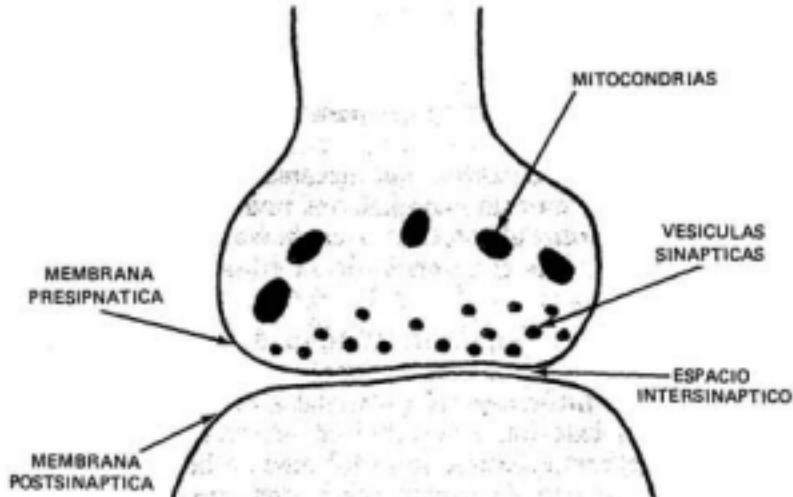
Como consecuencia de estos dos mecanismos, existe en el exterior de la fibra en estas condiciones una alta concentración de Na^+ con respecto al interior, y viceversa, una elevada concentración de K^+ en el interior de la fibra con respecto al exterior.

La alteración en un punto de la fibra de estas condiciones físicoquímicas determina una **corriente de acción**, que se manifiesta en una **inversión del potencial eléctrico**, que se hace negativo en el exterior y positivo en el interior de la membrana. Se dice entonces que la membrana se ha **despolarizado** en ese punto, y esto da nacimiento a una onda de despolarización que recorre toda la longitud de la fibra a gran velocidad.

El fenómeno de la despolarización tiene su origen en una súbita **alteración de la permeabilidad** de la membrana en un punto, que se hace mucho más permeable al Na^+ . Como la concentración exterior de dicho ion en la situación de reposo es muy elevada, este repentino aumento de la permeabilidad frente al Na^+ determina la entrada en chorro de gran cantidad de iones Na^+ , los cuales, por su carga positiva, invierten el signo eléctrico del interior de la membrana, haciéndolo positivo con respecto al exterior. A continuación se restablecen algo más lentamente las condiciones anteriores, saliendo ahora iones K^+ , que invierten de nuevo el signo eléctrico, quedando otra vez polarizada la fibra en el punto de referencia, es decir, dotada del potencial de reposo.

LA TRANSMISIÓN SINÁPTICA

Como es sabido, excepto en algunos sistemas nerviosos de animales inferiores, las unidades anatómicas y funcionales del sistema nervioso son las células nerviosas o **neuronas**, que constituyen unas cadenas a lo largo de las cuales se transmiten los impulsos nerviosos. Las terminaciones del axón de una determinada neurona se relacionan con las dendritas o con el cuerpo celular de otra o de otras neuronas, denominándose **sinapsis** a esta unión entre ambas células nerviosas. Es, pues, evidente que el mecanismo de transmisión del impulso nervioso que tiene su asiento en la membrana de la fibra nerviosa y del cuerpo de la neurona, no puede ser el mismo que el que asegure el «salto»



Esquema de una sinapsis.

de una a otra neurona en las sinapsis. Efectivamente, el mecanismo de la **transmisión sináptica** es de otra naturaleza, como veremos a continuación.

La terminación nerviosa al nivel de una sinapsis se engruesa en forma de maza, en la cual con el microscopio electrónico se puede ver una gran cantidad de pequeñas **vesículas** que vierten su contenido hacia el exterior de la membrana, que en este punto recibe el nombre de **membrana presináptica**. Alrededor de las vesículas se ven algunas **mitocondrias**.

El sector de la membrana de la neurona que recibe el impulso nervioso recibe el nombre de **membrana postsináptica**, y entre ella y la membrana presináptica existe una estrecha hendidura llamada **espacio intersináptico**, que separa morfológicamente ambas neuronas.

Estas imágenes sugieren, y algunos experimentos fisiológicos confirman, que la terminación nerviosa elabora en su extremo una **sustancia química** que va a hacer de intermediaria entre ambas neuronas. La **síntesis** de esta sustancia se produciría al llegar a la membrana presináptica la onda de despolarización que llega a ella a lo largo de la fibra, y exigiría un aporte de energía que atestigua la abundancia de mitocondrias a este nivel; la sustancia de referencia queda acumulada en las **vesículas presinápticas**, que la vierten después en el **espacio intersináptico**.

La sustancia química intermedia llega ahora a ponerse en contacto con la membrana postsináptica, determinando en ella una **despolarización** que se transmitirá en forma de onda por la célula y por la fibra axónica dependiente de esta última. Se sabe también que la sustancia intermedia es en la mayoría de los casos la **acetilcolina**, y en otros ciertas sustancias de otra naturaleza, como la **adrenalina** o la **histamina**.

A pesar de que la liberación de acetilcolina (o de cualquier otra sustancia química de las que intervienen en la transmisión sináptica) y su efecto sobre la membrana postsináptica son muy rápidos, la transmisión química propia de las sinapsis no es tan veloz como la transmisión de la onda de despolarización a lo largo de la membrana, por lo que los impulsos nerviosos al pasar por la sinapsis experimentan un ligerísimo retraso llamado **retardo sináptico**.

LOS EFECTORES

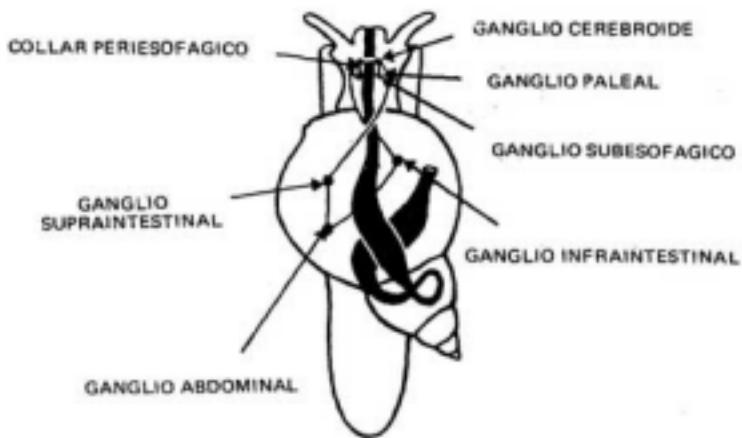
Hemos dicho anteriormente que los efectores son **músculos o glándulas** que responden a los estímulos nerviosos mediante una **contracción** o una **secreción**, respectivamente. Solamente añadiremos que las relaciones anatómicas y fisiológicas entre las terminaciones nerviosas y los órganos efectores son muy parecidas a las sinapsis, existiendo también un intermediario químico entre unas y otros.

LOS SISTEMAS NERVIOSOS GANGLIONARES

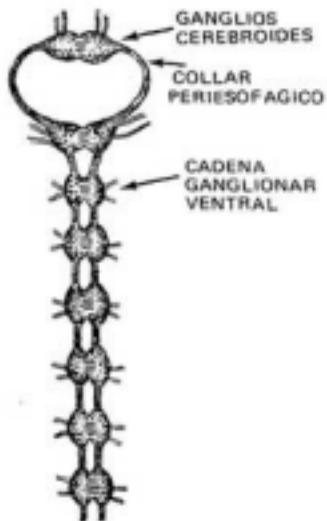
En general, en los animales, existen dos tipos de sistemas nerviosos bien caracterizados, los sistemas nerviosos **ganglionares** y los sistemas nerviosos **centrales**.

La mayoría de los animales invertebrados tiene un sistema nervioso **ganglionar**. Este se caracteriza porque las neuronas se acumulan en unas masas llamadas **ganglios**, los cuales se comunican unos con otros por medio de unos **nervios** formados por las fibras nerviosas dependientes de las células.

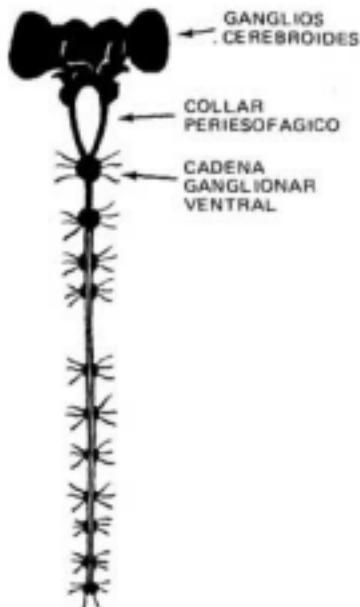
La disposición de los sistemas nerviosos ganglionares en los distintos grupos animales es muy variada. Sin embargo, existen algunas características comunes que parece necesario destacar.



Sistema nervioso de un molusco (carrasco marino).



Sistema nervioso de un arácnido.



Sistema nervioso de un insecto.

Así, por ejemplo, dado que la simetría bilateral es la regla en la mayoría de los animales invertebrados, los ganglios nerviosos suelen estar dispuestos de forma **simétrica**. En ciertos grupos de animales, como en los anélidos y artrópodos, se aprecia muy bien esta circunstancia, y los ganglios pueden observarse dispuestos por parejas a lo largo de la línea media del animal, unidos entre sí los de cada pareja por un nervio transversal, y los de cada lado, por sendos largos nervios longitudinales que se disponen también simétricamente. En otros grupos, en cambio, en los cuales la simetría bilateral se encuentra enmascarada por una torsión, por ejemplo, todo el sistema ganglionar ha experimentado torsiones que enmascaran en él la referida simetría, como sucede en los gasterópodos.

En segundo lugar, en los sistemas nerviosos ganglionares, el **volumen** y la **localización** de los diversos ganglios no son homogéneos. En los moluscos se puede observar, por ejemplo, que los escasos ganglios de que consta su sistema nervioso están situados precisamente en los **órganos más importantes** de su anatomía, como la cabeza, el pie, la cavidad paleal, el intestino, a cuyos órganos envían unas finas fibras nerviosas.

Por otra parte, los ganglios situados en la cabeza son más numerosos y más voluminosos, por lo que reciben el nombre de **ganglios cerebroideos**.

Por último, suele ser también muy parecida en unos y otros grupos de animales la disposición general del sistema nervioso ganglionar con respecto a los demás órganos. Efectivamente, en razón de la simetría bilateral de que se ha hablado, suele disponerse en conjunto como una **escalera de nudos**, dirigida de delante atrás y situada en la parte ventral del animal, por debajo del intestino, que está situado dorsalmente. Estas relaciones mutuas entre el sistema nervioso ganglionar y el intestino se invierten en la porción cefálica, de manera que los dos primeros ganglios de la cadena se sitúan por encima de la parte anterior del tubo digestivo o esófago. El esófago pasa así entre la primera y la segunda pareja ganglionar, y los nervios que unen a estos ganglios forman a su alrededor un **collar periesofágico** presente en muchos grupos de invertebrados.

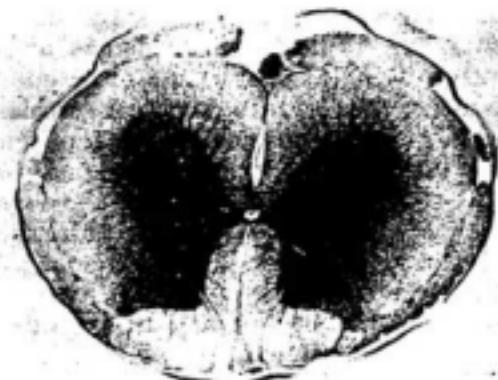
LOS SISTEMAS NERVIOSOS CENTRALES

Son característicos de los animales vertebrados, aunque en éstos existe también, como veremos, un sistema nervioso ganglionar.

Los sistemas nerviosos centrales se caracterizan por la presencia de unos órganos complejos denominados **centros nerviosos**. Estos centros se diferencian de los ganglios en que en ellos no radican solamente los cuerpos de las neuronas, sino también gran parte de las fibras nerviosas e incluso neuronas completas. En los centros nerviosos se realiza también gran cantidad de conexiones sinápticas entre unas neuronas y otras, de manera que en los centros los impulsos nerviosos pueden dirigirse por vías distintas a diversos órganos.

A simple vista pueden distinguirse en los centros nerviosos dos materiales de diferente aspecto que se denominan, respectivamente, la **sustancia gris** y la **sustancia blanca**. El estudio al microscopio nos enseña que la sustancia gris está formada principalmente por los cuerpos de las neuronas y la sustancia blanca por las fibras nerviosas que forman los áxones de dichas células, revestidos por una cubierta de mielina.

De los centros nerviosos emergen los **nervios**, constituidos por fibras nerviosas y en cuyo trayecto hay a veces intercalados unos ganglios; los nervios van a parar a todos los puntos del cuerpo y pueden dividirse en tres clases: los nervios **sen-**



Fotografía de un corte transversal de médula espinal mostrando hacia el exterior la sustancia blanca y hacia el interior la sustancia gris.

sitivos, formados por fibras que conducen los impulsos nerviosos de los órganos receptores a los centros; los nervios motores, que conducen los impulsos nerviosos hacia los órganos eferentes, y los nervios mixtos, en los cuales hay fibras sensitivas y fibras motoras.

EL SISTEMA NERVIOSO DE LOS MAMÍFEROS

El sistema nervioso de los vertebrados, y especialmente de los mamíferos, es **doble**, tanto desde el punto de vista anatómico como desde el fisiológico.

Anatómicamente aparece un sistema nervioso con **centros** y nervios, y otro formado por una serie de **ganglios** dispuestos simétricamente y unidos entre sí por nervios, de una manera parecida al sistema nervioso ganglionar de los invertebrados.

Desde el punto de vista de la fisiología, se pueden considerar dos sistemas, uno que rige la **vida de relación** del animal (órganos de los sentidos, movimiento), y otro que gobierna la **vida vegetativa** (movimientos de los órganos internos, secreción). Ambos sistemas nerviosos están intimamente relacionados.

Consideraremos, pues, el **sistema nervioso cerebro-espinal** y el **sistema nervioso ganglionar**.

EL SISTEMA NERVIOSO CEREBRO-ESPINAL

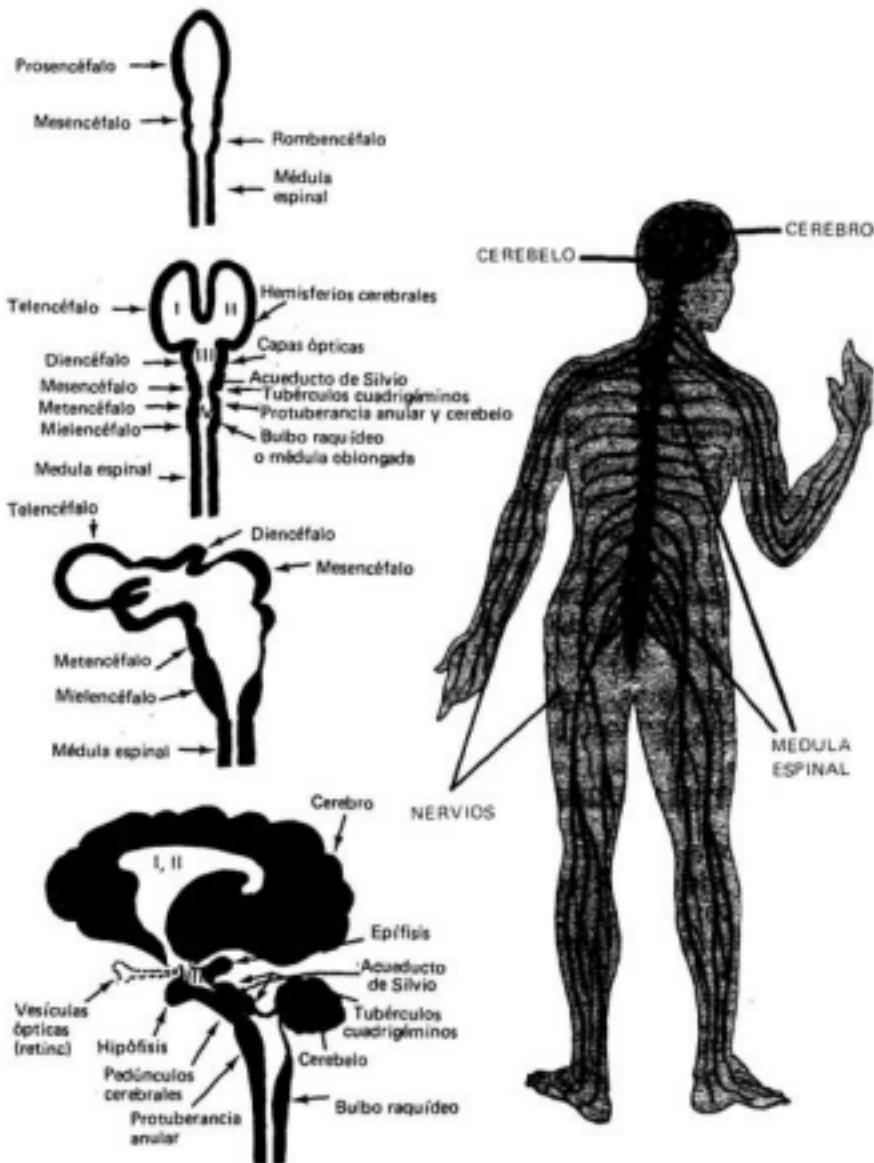
El sistema nervioso cerebro-espinal comprende:

- a) El **eje cerebro-espinal**, alojado en el cráneo y en la columna vertebral.
- b) Los **nervios cerebro-espinales**, que unen el eje con los órganos de los sentidos (órganos receptores) y con los músculos (órganos efectores).

El eje cerebro-espinal está compuesto del **encéfalo** y de la **médula espinal**; el primero, alojado en el interior del cráneo, y la segunda, en el interior de la columna vertebral.

El eje cerebro-espinal es realmente un tubo cerrado por ambos extremos y así se presenta en los embriones jóvenes.

Pronto, sin embargo, se diferenciarán en la parte anterior de este tubo nervioso **cinco vesículas**, que formarán el **encéfalo**, mientras la parte posterior será la **médula**.



Esquema del desarrollo embrionario del encéfalo de un mamífero.

Disposición del sistema nervioso cerebroespinal en el hombre.

La primera vesícula encefálica será el **cerebro**. Este está dividido longitudinalmente en dos vesículas simétricas, los **hemisferios cerebrales**, cuyas cavidades constituyen los dos **primeros ventrículos** y su pared la **corteza cerebral**. Una amplia comisura, el **cuerpo calloso**, une a ambos hemisferios.

La segunda vesícula formará el **diencéfalo**, con una serie de órganos encefálicos importantes, como la **hipófisis**, la **epífisis** y las dos **vesículas ópticas**. La cavidad del diencéfalo es el **tercer ventrículo**.

La tercera vesícula es el **mesencéfalo**, que tiene una cavidad muy estrecha y larga, denominada **acueducto de Silvio** y sus principales órganos nerviosos son los **tubérculos cuadrigéminos**.

La cuarta vesícula dará lugar a un órgano trilobulado, que sobresale dorsalmente por debajo de los grandes hemisferios cerebrales: el **cerebelo**.

Por último, la quinta vesícula dará lugar a un órgano ligeramente más ensanchado que la médula espinal, que recibe el nombre de **bulbo raquídeo**. La cavidad del bulbo, que se prolonga por debajo del cerebelo, es el **cuarto ventrículo**.

Por detrás del bulbo raquídeo se extiende la **médula espinal**, de paredes gruesas y cuya cavidad, prolongación del cuarto ventrículo, es un fino conducto denominado **epéndimo**.

Del encéfalo salen doce pares de nervios, llamados **nervios craneales**, que inervan los órganos de los sentidos y otros órganos, como la faringe, los órganos respiratorios, el corazón, etcétera. La mitad de ellos son nervios motores y hay tres pares de nervios sensitivos y otros tres de mixtos.

De ambos lados de la médula espinal, a trechos regulares y saliendo al exterior de la columna vertebral entre cada dos vértebras, salen 31 pares de **nervios raquídeos**, que van a parar a los músculos estriados y a la piel del tronco y de las extremidades. Los nervios raquídeos son todos ellos nervios mixtos, con una **raíz motora** que sale de la médula por la parte ventral de ésta y otra **raíz sensitiva** que entra en la médula por la parte dorsal. Intercalado en el trayecto de esta rama sensitiva hay un **ganglio**, en el que radican los cuerpos celulares de las neuronas sensitivas, mientras los cuerpos de las neuronas motoras residen en la sustancia gris de la médula.

FUNCIONES DEL SISTEMA NERVIOSO CEREBRO-ESPINAL

Los diversos órganos del sistema nervioso cerebro-espinal desempeñan distintas funciones en la vida del animal. El **cerebro** es el asiento de la **sensibilidad** y de la **motoricidad conscientes**; las fibras nerviosas sensitivas de los nervios raquídeos que llegan a la médula espinal por las raíces posteriores, se articulan en la médula con otras fibras ascendentes que conducen los estímulos sensitivos hasta la corteza cerebral, en donde se hacen conscientes, es decir, se transforman en sensaciones; de la misma manera, las neuronas de la corteza cerebral envían órdenes por medio de unas fibras descendentes a la médula y de allí los estímulos correspondientes salen por las raíces motoras de los nervios raquídeos hasta los músculos por ellas inervados.

El **cerebelo** y el **bulbo raquídeo** son los órganos de la **coordinación de los movimientos**, voluntarios o involuntarios.

Por último, la **médula espinal** es la sede de los **movimientos reflejos**, involuntarios, desencadenados por los estímulos que llegan a ella por las raíces sensitivas de los nervios raquídeos y que provocan inmediatamente una respuesta que sale de la médula por las raíces motoras.

Otra importante misión del sistema nervioso cerebro-espinal es la de dirigir, gobernar y servir muchas veces de **antagonista** al sistema nervioso ganglionar, con el que se halla anatómica y funcionalmente muy ligado.

EL SISTEMA NERVIOSO GANGLIONAR

Está formado por dos **cordones de ganglios** unidos por unos nervios a lo largo de la porción ventral del cuerpo, desde el cuello hasta la parte inferior del vientre. De estos ganglios nacen unos nervios que van a parar a las vísceras, como el estómago, el hígado, los riñones, etc., existiendo también en algunos órganos unos ganglios en el espesor de sus paredes.

Los ganglios están a su vez conectados con fibras nerviosas procedentes de la médula espinal, las cuales se articulan allí sinápticamente con las células de los ganglios que, a su vez,

envían su axón a la víscera correspondiente, estableciéndose así una dependencia indirecta de los órganos con respecto a la médula espinal.

SISTEMAS NERVIOSOS ORTOSIMPATICO Y PARASIMPATICO

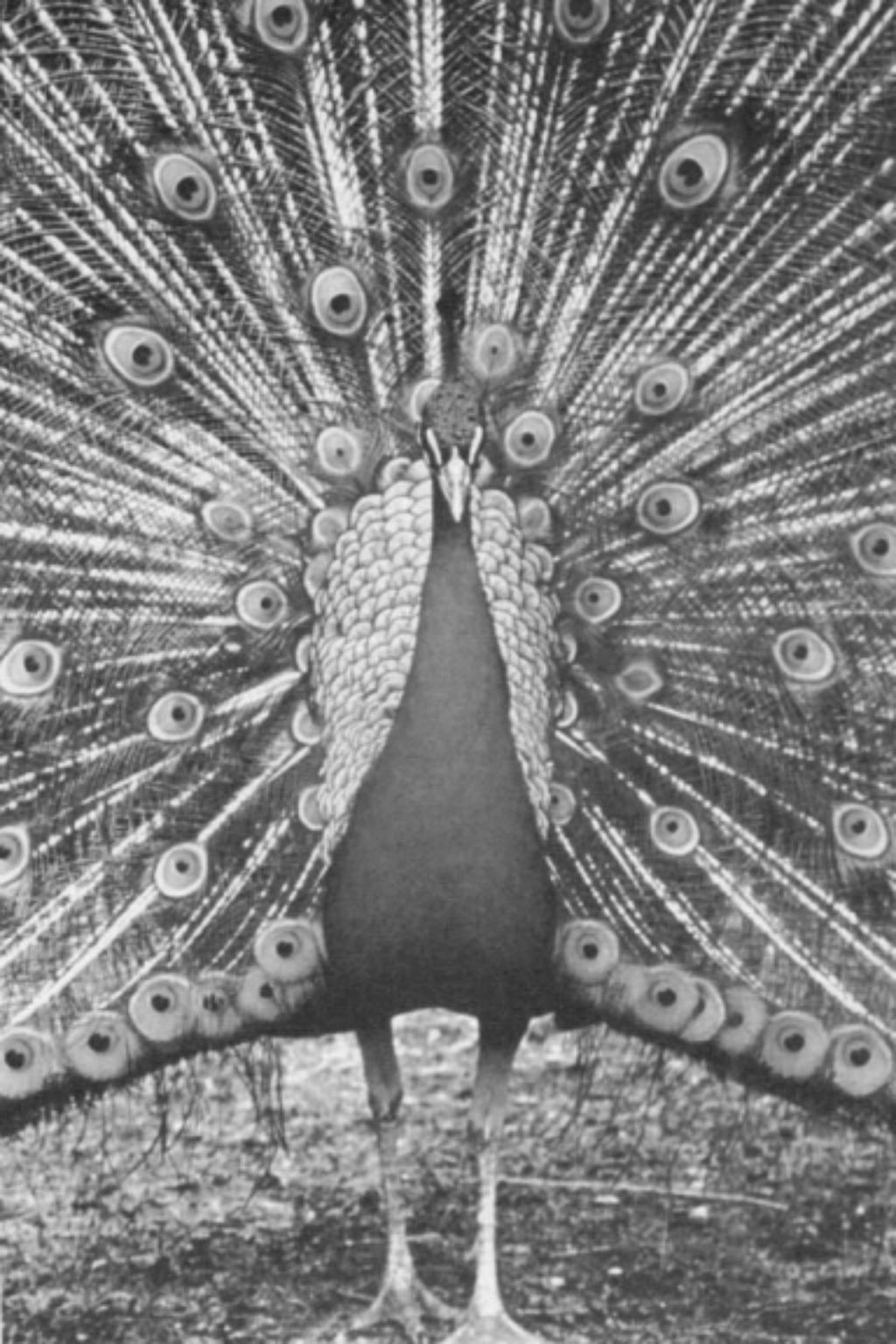
Desde el punto de vista funcional, en los mamíferos y en el hombre se pueden distinguir dos sistemas nerviosos que gobernan las actividades de los órganos de la vida vegetativa, el **ortosimpático** y el **parasimpático**.

El sistema nervioso **ortosimpático** es el conjunto del sistema nervioso **ganglionar**, más los nervios que llegan a él desde la médula espinal, que son ramificaciones de los nervios raquídeos.

El sistema nervioso **parasimpático** tiene una estructura anatómica menos definida, pues está constituido por ciertas secciones del sistema nervioso cerebro-espinal, como el **mesencéfalo**, el **bulbo raquídeo** y la **porción sacra de la médula espinal**, más los nervios que salen de estas secciones y que van a parar a las vísceras.

El sistema nervioso ortosimpático y el parasimpático son **antagonistas**, es decir, ejercen acciones opuestas sobre los órganos. Así, por ejemplo, los movimientos del estómago y de los intestinos se hacen más rápidos por la acción del parasimpático y más lentos cuando los estimula el simpático; por el contrario, los movimientos del corazón se aceleran por el ortosimpático y se retardan por el parasimpático.

Ortosimpático y parasimpático, pues, por sus acciones antagonicas, son **sistemas reguladores** de la actividad de los órganos, actividad que se acomoda así en su intensidad o en su rapidez a las condiciones generales del organismo.



LAS HORMONAS

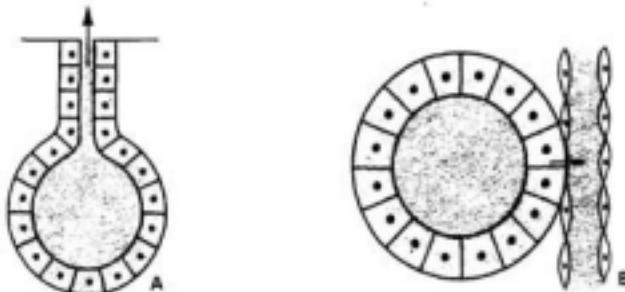
La coordinación funcional entre los órganos de los animales no solamente viene asegurada por el sistema nervioso; existe, además, un mecanismo que sirve a los mismos fines y que consiste en la acción de unas sustancias químicas que circulan por el organismo transportadas por la sangre, llamadas hormonas, y que ejercen su actividad en puntos muy distantes del lugar en donde se producen.

La regulación hormonal de la actividad orgánica no es absolutamente distinta de la regulación nerviosa, pues ya sabemos que la transmisión nerviosa se realiza en las sinapsis y en las terminaciones efectoras por medio de sustancias químicas, pero las hormonas suelen tener una acción más generalizada que los estímulos nerviosos, ya que la sangre las conduce a la totalidad del organismo, quedando, pues, sujetas a su acción todas las células del mismo.

◀ El vistoso plumaje del macho del pavo real se debe a la acción de las hormonas sexuales.

LAS GLANDULAS ENDOCRINAS

Con frecuencia, las células glandulares se reúnen formando unos órganos denominados **glándulas**, que están dotados de conductos excretores que sirven para la evacuación de los productos elaborados por dichas células glandulares. Los conductos excretores llevan el producto glandular al punto en donde ha de ejercer su acción fisiológica (secreción), como es el caso, por ejemplo, de las glándulas salivales, o lo eliminan al exterior (excreción), como, verbigracia, las glándulas sudoríparas.



Esquema de una glándula exocrina (A) y de una glándula endocrina (B). Obsérvese que en esta última no hay conducto excretor, y sus productos son vertidos directamente a la sangre.

Existen, sin embargo, grupos de células glandulares que no forman glándulas y otros que forman glándulas desprovistas de conducto excretor y que, por consiguiente, dan salida a su producción por los capilares sanguíneos que las surcan; se puede decir, pues, que estas células glandulares vierten su producto directamente en la sangre. Dichos grupos de células glandulares, organizadas o no en glándulas verdaderas, se llaman genéricamente **glándulas endocrinas, glándulas incretoras o glándulas de secreción interna** y sus productos son las **hormonas**.

ACCION DE LAS HORMONAS

La acción fisiológica de las hormonas se caracteriza por una serie de aspectos, aparte de su origen, que garantizan el papel fundamental que asumen en la coordinación orgánica.

En primer lugar, la coordinación hormonal, a diferencia de la coordinación nerviosa, es de acción relativamente lenta y menos

precisa que ésta. Esto se debe a que la circulación sanguínea, vehículo de las hormonas, es, igualmente, más lenta y difusa que la transmisión de los impulsos nerviosos.

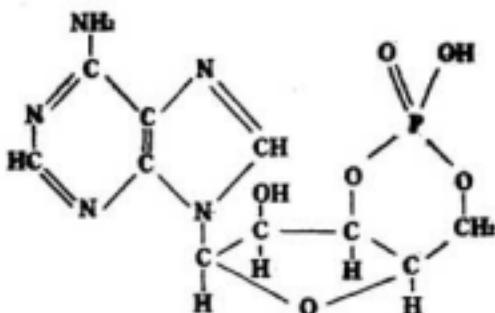
En segundo lugar, las hormonas actúan, a diferencia de otros productos orgánicos, en **dosis sumamente pequeñas**, por lo que se pueden considerar, al lado de las enzimas y las vitaminas, en la categoría de los **biocatalizadores**. Ahora bien, esta circunstancia hace que la acumulación en los tejidos de las hormonas producidas por las glándulas endocrinas sea muy perjudicial para las células, las cuales alteran notablemente sus funciones cuando son sometidas a dosis hormonales relativamente grandes, como sucede en los casos patológicos en que se producen cantidades anormalmente elevadas de una determinada hormona.

Por consiguiente, existen unos precisos **mecanismos reguladores de la producción de hormonas**, mecanismos que unas veces están representados por otras hormonas y que en otras ocasiones pertenecen al sistema nervioso, produciéndose en este último caso la necesaria conexión entre ambos sistemas reguladores orgánicos. Además, las hormonas son **rápidamente destruidas por el metabolismo celular**, condición necesaria para que no se acumulen en la sangre ni en los tejidos.

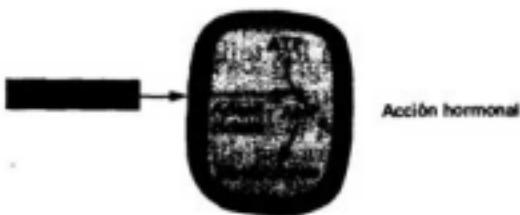
Por último, hay que tener en cuenta que las hormonas, a partir de la glándula endocrina productora, se difunden por todo el organismo, llegan a todas las células y, sin embargo, no ejercen una acción semejante en todas ellas. Esto se debe principalmente a las distintas propiedades de las estirpes celulares, cuya diferenciación se ha producido también en este aspecto. En general se puede decir que las hormonas funcionan a nivel celular induciendo la **síntesis de determinadas enzimas** o bien alterando **selectivamente la permeabilidad de la membrana celular**, con la correspondiente desviación del metabolismo de la célula cuya permeabilidad ha cambiado.

Se sabe hoy también que ciertas hormonas, como, por ejemplo, la epinefrina, actúan sobre la membrana celular determinando en ésta la aparición de una enzima, la **adenilciclasa**, que actúa sobre el ATP dando origen a un adenosín monofosfato especial,

el AMP cíclico (AMP-c), el cual modifica específicamente el metabolismo celular.



AMP cíclico



Acción del AMP cíclico. Modifica la membrana celular liberando la enzima adenilciclasa, que convierte ATP en A.

MANIFESTACIONES DE LA ACCIÓN DE LAS HORMONAS

Desde el punto de vista fisiológico, tres son las acciones que se pueden considerar en la actividad de las hormonas: la **acción dinámica**, por la cual una hormona estimula a una célula a la producción de un determinado compuesto, o a un músculo a contraerse; la **acción metabólica**, por la que una célula acelera o retarda su metabolismo por la acción de una hormona; y la **acción morfogenética**, que se hace patente en órganos o tejidos que ven estimulados su crecimiento y la diferenciación de sus células por la acción hormonal.

COMPOSICION QUIMICA DE LAS HORMONAS

Las hormonas son muy heterogéneas desde el punto de vista químico. Unas son **esteroides**, como el **cortisol** y las **hormonas sexuales**; otras, como la **adrenalina** y la **tiroxina**, son **derivados de aminoácidos**; otras, como las **hormonas de la hipófisis** y la **insulina**, son **polipéptidos**.

En la actualidad se conoce perfectamente la composición química de muchas hormonas, y de bastantes de ellas es posible su síntesis en el laboratorio, lo que ha permitido recientemente un gran avance no solamente de la investigación en este campo de la biología, sino también en el tratamiento de muchas enfermedades que, como veremos, tienen su origen en una deficiencia hormonal.

LAS HORMONAS EN EL HOMBRE

La investigación sobre las hormonas y su acción se ha llevado sobre todo a cabo sobre las del hombre y las de los animales superiores. Examinaremos, pues, las principales glándulas endocrinas del organismo humano, con las hormonas que éstas producen y su acción sobre los distintos sistemas orgánicos.

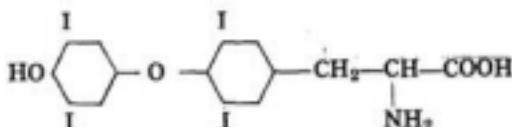
Estas son: el **tiroides**, las **glándulas paratiroides**, el **páncreas endocrino**, el **epitelio intestinal endocrino**, las **glándulas suprarrenales**, los **testículos** y los **ovarios**, y la **hipófisis**.

EL TIROIDES

Es un órgano voluminoso, situado delante de la tráquea, cuya estructura histológica revela unas grandes vesículas formadas por las células glandulares. Las vesículas están llenas de una sustancia espesa, denominada **coloide**.

La hormona segregada por el tiroides es la **tiroxina**, sustancia derivada del aminoácido **tirosina** y en cuya composición entra **yodo**.

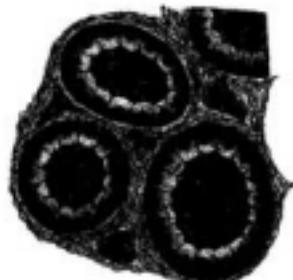
La tiroxina tiene la estructura siguiente:



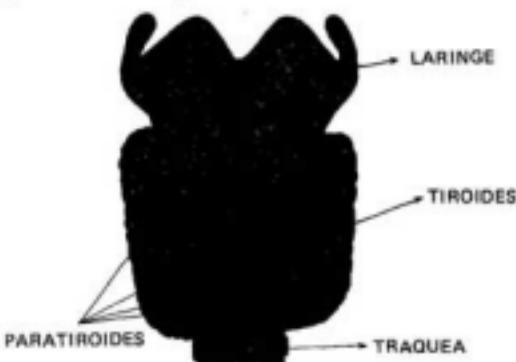
La tiroxina se almacena en las vesículas tiroideas combinada con una **globulina**, formando la sustancia llamada **tiroglobulina**, que no es otra cosa que el coloide de que antes hablamos. Cuando las necesidades fisiológicas lo exigen, la tiroglobulina se desdobra de nuevo en globulina y tiroxina, que es vertida a la sangre. Las células glandulares del tiroides tienen, pues, la doble misión de extraer el yodo de la sangre y combinarlo con dos moléculas de tirosina para formar tiroxina y combinar ésta con la globulina para almacenar tiroglobulina; y la de descomponer en su momento la tiroglobulina para segregar tiroxina. La acción fisiológica de la tiroxina se ejerce sobre dos grupos de funciones:

a) **Función morfogenética.** La tiroxina estimula el crecimiento y el desarrollo de los órganos, especialmente de los tejidos óseo y nervioso.

b) **Regulación del metabolismo.** La tiroxina estimula el metabolismo celular, aumentando el metabolismo basal, y regula también la cantidad de agua en los tejidos.



Corte de glándula tiroidea. Las vesículas tiroideas están llenas de coloide. Entre ellas se ven vasos sanguíneos con glóbulos rojos.



Glándula tiroidea y glándulas paratiroides.

Existen dos anomalías en ciertas personas, que nos pueden ilustrar sobre los efectos de la tiroxina. Una de ellas consiste en una producción escasa de la hormona, es decir, en una **hipofunción**; la otra es la producción de dicha sustancia en exceso, es decir, una **hiperfunción**.

La **hipofunción tiroidea** en los individuos jóvenes tiene como consecuencia el **cretinismo hipofisario**. Los individuos son enanos e insuficientes mentales (falta de la acción morfogenética); su piel es seca y rugosa, sus cabellos escasos y frágiles, y el agua se almacena en los tejidos, que se hacen **edematosos**, es decir, que están permanentemente hinchados (falta de regulación metabólica).

La **hiperfunción**, acompañada generalmente de un aumento de volumen del tiroides que se manifiesta al exterior como un abultamiento del cuello (**bocio**), se manifiesta en un aumento del metabolismo basal, que se refleja en una temperatura elevada, una excitación nerviosa exagerada y un adelgazamiento debido a la excesiva rapidez de consumo de los alimentos; estos síntomas son los que se manifiestan en la **enfermedad de Basedow**, llamada también **bocio exoftálmico**, porque los ojos de los pacientes parecen querer salirse de las órbitas.



Cretinismo
(por cortesía del Dr. Pozuelo Escudero).

LAS GLANDULAS PARATIROIDES

Son éstas unas minúsculas glándulas adheridas al tiroides y casi imperceptibles por tener el mismo aspecto exterior que éste. Segregan una hormona, la **paratirina**, que es un polipéptido cuya exacta naturaleza no se conoce todavía.

La paratirina interviene en el **metabolismo del calcio y del fósforo**, por lo que tiene un papel decisivo sobre la **mineralización del esqueleto**, aparte de sobre las demás funciones orgánicas donde intervienen estos elementos.

La **hipofunción paratiroidea** tiene como consecuencia el **descenso del calcio en la sangre**, lo que determina una excitabilidad anormalmente aumentada en los nervios y músculos, con **calambres, convulsiones, etc.**

EL PANCREAS ENDOCRINO

Como hemos visto, el páncreas es una glándula digestiva exocrina, que vierte el jugo pancreático en la luz del intestino delgado. Pero el páncreas tiene algunas células productoras de **hormonas** que no van a parar al intestino, sino a la sangre que baña dicha víscera. Estas células están reunidas en unos grupos denominados **islotes de Langerhans**, cuyo conjunto constituye una glándula incretora denominada **páncreas endocrino**.

Dos hormonas se segregan en el páncreas endocrino, el **glucagón** y la **insulina**. Ambas son polipéptidos de composición conocida y cuya acción fisiológica es opuesta.

El **glucagón** activa la fosforilización del glucógeno del hígado, provocando así la hidrólisis de este compuesto en glucosa, que pasa a la sangre; como esto determina el **aumento de la cantidad de glucosa en la sangre circulante**, es decir, la glucemia, se dice que el glucagón tiene una **acción hiperglucemianta**.

Por el contrario, la **insulina** aumenta la permeabilidad de las membranas celulares para la glucosa, activa la oxidación de este azúcar y favorece la formación de glucógeno y de lípidos a

partir de la glucosa, disminuyendo, pues, la cantidad de glucosa circulante: la insulina es una hormona **hipoglucemiant**e.

En la regulación de la glucemia interviene también de una manera primordial una hormona de las glándulas suprarrenales, la **adrenalina**, por lo que estudiaremos este fenómeno en su conjunto cuando tratemos de estas glándulas.

La **hipofunción** del páncreas endocrino da origen a una enfermedad desgraciadamente muy frecuente, la **diabetes**, que se caracteriza porque la cantidad de glucosa que circula en la sangre es tan elevada que el riñón elimina el exceso, encontrándose glucosa en la orina en mayor o menor cantidad (**glucosuria**). Estas hiperglucemias y glucosurias van acompañadas en la diabetes de otras anomalías del metabolismo, que determinan la aparición de diversos compuestos anormales en la sangre y la orina, como la **acetona**.

EL EPITELIO INTESTINAL

También el **epitelio intestinal**, por lo menos en algunas de sus regiones, funciona como glándula incretora, con la secreción de hormonas. Las más importantes son la **secretina** y la **pancreozimina**, ambas segregadas por la **mucosa duodenal**; la secretina es un polipéptido que estimula la secreción de un jugo



Parte del abdomen humano, en donde se ven los riñones con sus glándulas suprarrenales.

pancreático rico en agua y pobre en enzimas digestivas; la pancreozimina, por el contrario, induce la secreción de un jugo pancreático rico en enzimas.

LAS GLANDULAS SUPRARRENALES

En el organismo humano existen encima de cada uno de los dos riñones sendos órganos pequeños, que forman una especie de caperuza sobre aquéllos. Estos órganos, denominados **glándulas suprarrenales** y también **cápsulas suprarrenales**, son glándulas incretoras, que segregan hormonas de dos tipos. Estos dos tipos responden a la estructura anatómica de la glándula, claramente dividida en dos regiones: la corteza, exterior, y la médula, interior. A su vez, estas dos regiones aparecen al principio en el embrión como dos esbozos distintos que se unen después para formar un solo órgano, por lo que no debe extrañar que ambas regiones den origen a hormonas muy diferentes, pues en realidad se trata de dos glándulas distintas unidas anatómicamente en un solo órgano.

Las glándulas suprarrenales se denominan frecuentemente **glándulas adrenales**, sobre todo en los animales, en donde no están sobre el riñón, sino al lado del dicho órgano.

Hormonas de la corteza adrenal

La corteza adrenal da origen a una gran cantidad de hormonas derivadas todas ellas del colesterol. Son, pues, **esteroides** y por ello se denominan **corticosteroides**.

Se pueden dividir en dos grupos: las que actúan sobre el metabolismo de los iones inorgánicos, **mineralocorticosteroides**, y las que influyen en el metabolismo de los glucídicos, **glucocorticosteroides**.

La más importante de las primeras es la **aldosterona**, que regula la excreción de agua y que inhibe la secreción de Na^+ por la orina, el sudor y la saliva, estimulando, en cambio la salida de K^+ . Entre las segundas, las más notables son el **cortisol** y la **corticosa-**

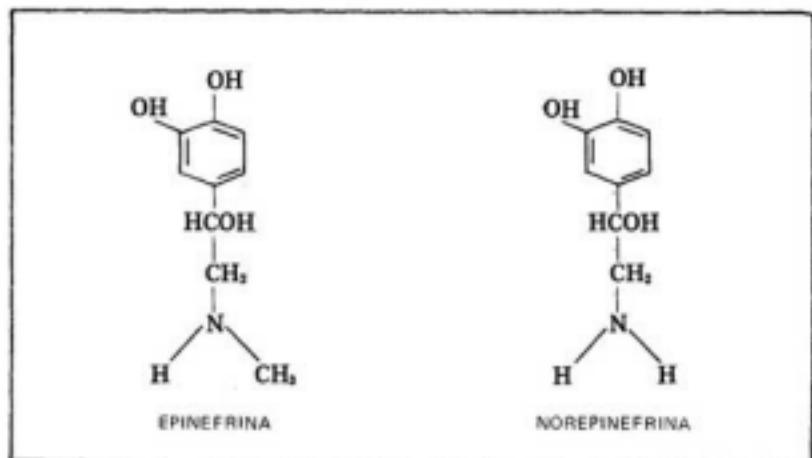
terona, que inducen la transformación de las proteínas en glucosa, al tiempo que aumentan la reserva de glucógeno en el hígado.

La corteza adrenal segregá también esteroides idénticos a los que se encuentran en el testículo, y cuya acción veremos después, como la androsterona, muy semejante químicamente a la testosterona que elabora aquel órgano.

Hormonas de la médula adrenal

La hormona de la médula adrenal es la **adrenalina**, nombre con que se designa la mezcla de dos derivados del aminoácido tiroxina muy semejantes en su composición química, la **epinefrina** y la **norepinefrina**.

Las proporciones de epinefrina y norepinefrina en la adrenalina varían según la especie animal de que se trate. En el hombre y en el perro el 80 % de la mezcla está representado por la epinefrina.



La adrenalina tiene, principalmente, una acción metabólica y una acción dinámica.

Su acción sobre el metabolismo consiste en la hidrólisis del glucógeno en glucosa en el hígado y en los músculos, así como la estimulación de la oxidación de los ácidos grasos. La adrenalina es, pues, una hormona hiperglucemiantre.

La acción dinámica de la adrenalina se concreta en una serie de efectos sobre los órganos, que se parecen a los que produce la excitación del sistema nervioso ortosimpático, por lo que se dice que es una acción simpaticomimética: se eleva la presión arterial, se dilatan las pupilas, se aceleran los movimientos del corazón y se hacen más lentos los movimientos autónomos del aparato digestivo. Todos estos efectos van encaminados a preparar al organismo para la acción frente a un peligro o frente a cualquier otra eventualidad, a lo que colabora la acción metabólica de esta hormona, que pone a disposición de los músculos mayor cantidad de energía. A consecuencia de la liberación a la sangre de adrenalina se dice, pues, que el organismo se coloca en una situación ergotropa.

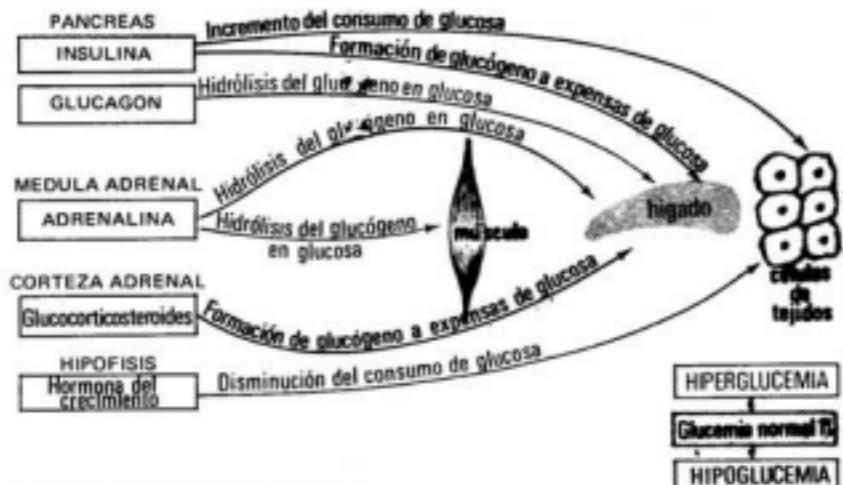
La regulación de la glucemia

Veamos ahora cómo se produce la regulación de la glucemia o cantidad de glucosa en sangre, en la cual intervienen varios factores hormonales que influyen sobre los mecanismos productores de glucosa y sobre el consumo de este azúcar, de manera que entre la producción y el consumo se establece un equilibrio dinámico que mantiene la glucemia en un nivel constante, que en el hombre es del 0,1 %, aproximadamente.

Los mecanismos productores de glucosa son, principalmente, la conversión de glucógeno en glucosa (**glucogenolisis**) y la transformación de prótidos y de lípidos en dicho azúcar.

El consumo de glucosa se puede hacer, ya por la degradación catabólica de la glucosa que, como sabemos, se transforma en CO_2 , H_2O y energía, ya por su polimerización para formar glucógeno (**glucogenogénesis**) o por su conversión en lípidos.

Pues bien, la insulina activa los procesos consumidores de glucosa, y el glucagón y la adrenalina, por el contrario, estimulan



Esquema de la regulación de la glucemia.

la glucogenolisis, el primero en el hígado y la segunda en hígado y músculos.

Pero, además, intervienen en esta regulación otras hormonas, como los **glucocorticosteroides**, que, como hemos visto, activan la transformación de las proteínas en glucosa y de ésta en glucógeno, y también la **hormona del crecimiento** de la hipófisis, que estudiaremos más adelante y que inhibe precisamente esta formación, retardando además los fenómenos de la oxidación de la glucosa en las células, con lo cual eleva el nivel de glucosa en sangre.

Como se ve, la regulación de la glucosa es un proceso complicado, en el que intervienen varios mecanismos hormonales; así se garantiza, en los casos de ligeras hipofunciones de algunas hormonas, la entrada en acción de otros mecanismos compensadores.

LAS HORMONAS SEXUALES

El ovario y el testículo, aparte de su papel primordial como formadores de gametos, son también glándulas endocrinas cuya función es la formación de unas hormonas llamadas **hormonas sexuales**.



Las hormonas sexuales regulan los caracteres sexuales que diferencian a machos y hembras. Observense las diferencias de forma y de comportamiento entre gallos y gallinas.

Las hormonas sexuales son unos **esteroides** muy semejantes entre sí desde el punto de vista químico, e intervienen en la determinación de las características sexuales, tanto aquéllas ligadas directamente con la reproducción como los denominados **caracteres sexuales secundarios**, que no están relacionados con dicha función a no ser porque señalan caracteres muy distintos en los individuos de sexos diferentes, como son el mayor desarrollo de los músculos y huesos en el varón, la falta de barba en la mujer, la presencia de espolón y de cresta erguida en el gallo, etc. Distinguiremos entre las hormonas que se forman en el testículo y tienen su origen en el ovario.

Hormonas del testículo

Estas hormonas se llaman **andrógenas** y se originan principalmente a partir de la colesterina de la sangre. La principal es la **testosterona**, hormona que, por una parte es la responsable de la movilidad y de la supervivencia de los espermatozoides y por otra de la aparición en la pubertad de una gran cantidad de características masculinas secundarias (en el hombre, barba, estructura de la laringe que determina la voz grave, desarrollo del esqueleto y de los músculos, aparición de vello en varios lugares del cuerpo), así como una serie de actitudes frente al sexo opuesto (en los animales, paradas nupciales, luchas, acotamiento de territorios de acoplamiento, etc.).

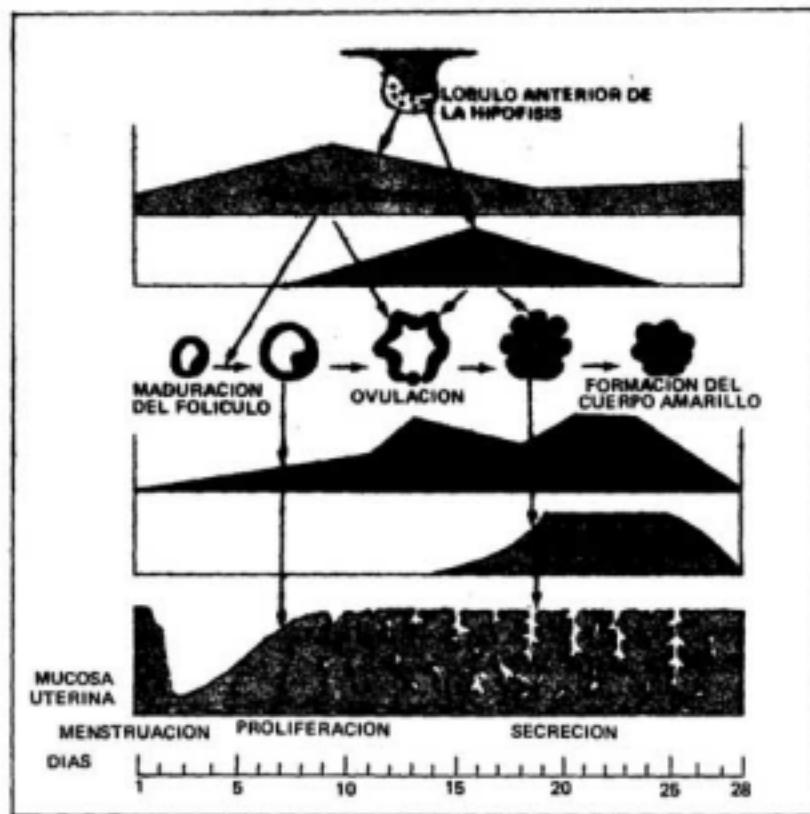
La hipofunción del testículo lleva consigo la desaparición o la atenuación de estos efectos de la testosterona, pero además desencadena algunos trastornos psíquicos, lo que demuestra que esta hormona influye también sobre las funciones intelectuales que componen la personalidad. Esto se debe principalmente a que la testosterona estimula también, en general, la síntesis de las proteínas.

Hormonas del ovario

Son principalmente la foliculina y la progesterona. La primera, junto con otras llamadas estrógenas, de las que forma parte, tiene su origen en los folículos ováricos. Estas son unas formaciones vesiculares en las que nacen y maduran los óvulos, uno en cada folículo. Al crecer cada folículo se produce una cierta cantidad de estrógenos, que se vierten en la sangre, cesando la producción de estas hormonas cuando el folículo deja escapar al óvulo. Como quiera que la maduración de los folículos se hace sucesivamente, la producción de estrógenos no es continua, dando lugar a unas oscilaciones periódicas en la cantidad de estrógenos circulantes.

Aparte de su misión en la conformación del cuerpo femenino, con sus características sexuales primarias y secundarias peculiares (formación y crecimiento de los órganos reproductores, redondeamiento de las formas, aparición de vello en algunos puntos, etc.) la foliculina y los demás estrógenos tienen una acción muy importante en los mamíferos en la preparación de la musculatura y de la mucosa uterina para el alojamiento del embrión. Si no hay fecundación después de esta preparación, y una vez que disminuye la tasa de estrógenos en la sangre, se produce una regresión de dichos cambios anatómicos.

La otra hormona importante producida por el ovario es la progesterona, que se produce en un tejido, el cuerpo amarillo, que aparece en el folículo después del desprendimiento del óvulo. La progesterona prepara al organismo para la gestación, haciendo aparecer glándulas en su mucosa uterina, preparando para la lactación las glándulas mamarias, etc. Cuando se produce la fecundación, la progesterona se forma también en la placenta. Lo mismo que las hormonas masculinas, también las femeninas



Esquema de la regulación hormonal del ciclo menstrual femenino. Las hormonas hipofisarias FSH y LH determinan la maduración del folículo y la formación del cuerpo amarillo, respectivamente, así como la secreción de foliculina y progesterona, que actúan sobre la mucosa uterina.

tienen una acción de activación sobre el metabolismo general, por lo cual, en caso de hipofunción de los ovarios pueden aparecer perturbaciones de toda índole, en especial trastornos psíquicos.

LA HIPOFISIS

La hipófisis es una pequeña glándula, de origen embriológico mixto, que se encuentra sobresaliendo del suelo del tercer ventrículo cerebral y alojada en la silla turca del esfenoides. Com-



Esquema de la hipófisis.

prende tres lóbulos, el anterior, cuyo origen se encuentra en la faringe embrionaria; el posterior, que es un divertículo encefálico; y el intermedio, situado entre ambos.

Los lóbulos anterior y posterior de la hipófisis son importan-
tisimas glándulas endocrinas.

Las principales hormonas producidas en la hipófisis son las si-
guientes:

Hormonas del lóbulo posterior o neurohipófisis

La **ocitocina** o **prolactina** tiene su principal acción sobre la mus-
culatura del útero, favoreciendo su contracción en el momento
del parto. También estimula la producción de leche por las
glándulas mamarias.

La **vasopresina** o **adiuretina** aumenta la presión sanguínea, es-
timulando la reabsorción de agua en los tubos uriníferos y, por
consiguiente, impide la excesiva eliminación de agua por la
orina.

Hormonas del lóbulo anterior o adenohipófisis

La **hormona del crecimiento** o **somatotropina** estimula el cre-
cimiento de huesos y cartílagos, sobre todo regulando la utiliza-
ción de las proteínas por los tejidos. Su hipofunción determina



Un caso de gigantismo (2,08 m) entre dos hombres de talla normal.

un **enanismo hipofisario**, que consiste en una falta de desarrollo corporal e intelectual. Su hiperfunción, por el contrario, induce un desarrollo anormal, que en los jóvenes se traduce en un **gigantismo**, y en los individuos adultos, en un crecimiento excesivo de los huesos de la cara y de las extremidades denominado **acromegalia**. Esta hormona influye también sobre el metabolismo de los glucidos, como se ha visto, interviniendo así en la regulación de la glucemia.

D. Sebastián de Morra, enano pintado por Velázquez.



Las hormonas glandotropas. Estas hormonas, llamadas también **estimulinas**, son las que confieren al lóbulo anterior de la hipófisis una importancia fundamental en la regulación orgánica. En efecto, estas hormonas obran sobre las demás glándulas endocrinas, estimulando su funcionamiento y la producción de las hormonas respectivas. Son las siguientes:

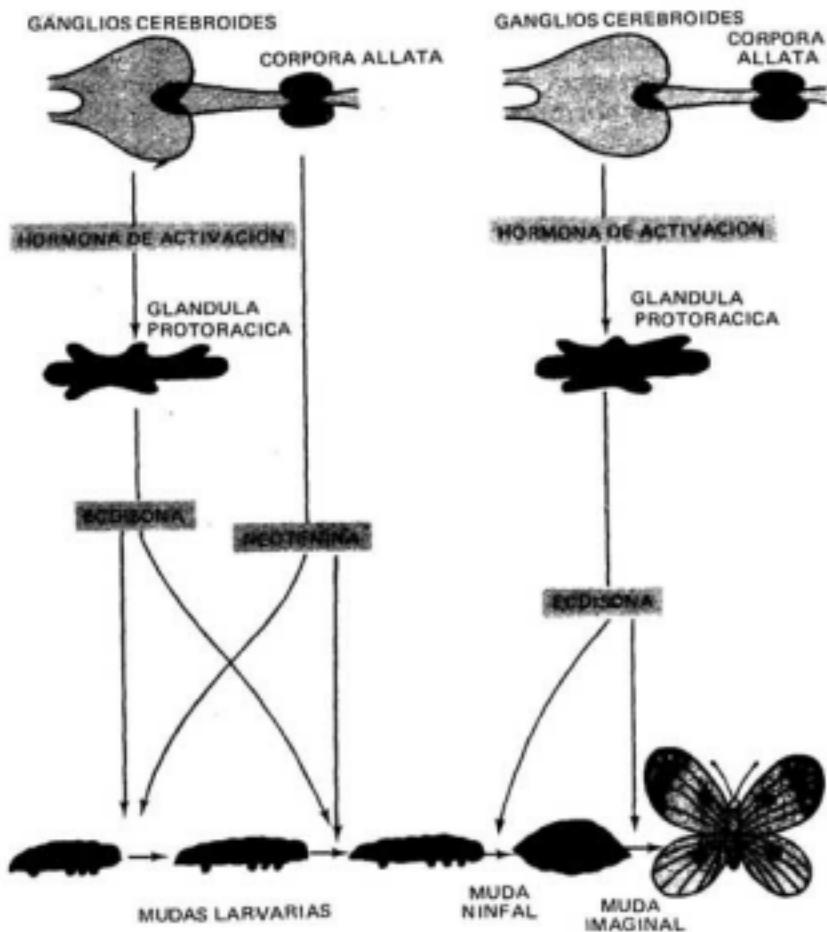
La **hormona tirotropa (TSH)**, que actúa sobre el tiroides; la **hormona corticotropa (ACTH)**, que ejerce su acción sobre la corteza adrenal; y las **hormonas gonadotropas**, que estimulan la producción de las hormonas sexuales. De estas últimas, la **foliculoestimulina (FSH)** regula la maduración folicular en el ovario y la secreción de estrógenos; la **hormona luteinizante (LH)** induce la formación del cuerpo amarillo y la secreción de progesterona; y la **hormona luteotropa (LTH)** colabora con la anterior induciendo la secreción de progesterona en dicho cuerpo amarillo. La FSH y la LH actúan también en el testículo, estimulando la secreción de testosterona.

El lóbulo anterior de la hipófisis funciona así como una especie de **coordinador general** de las secreciones hormonales, regulando así indirectamente el funcionamiento de todo el organismo. Bien es verdad que, a su vez, el lóbulo anterior de la hipófisis está estimulado por una secreción elaborada por ciertas células nerviosas del **hipotálamo** (en el suelo del tercer ventrículo), de manera que, en último término, el estímulo emana del tejido nervioso del encéfalo por este mecanismo de **neurosecreción**.

LAS HORMONAS EN LOS INVERTEBRADOS

Aunque mucho menos estudiadas que en los vertebrados, se conocen también algunas hormonas en animales invertebrados, las cuales sirven también para coordinar las funciones orgánicas generales, sobre todo en las ocasiones en que tienen que producirse acciones simultáneas que requieren este tipo de regulación.

Sirva de ejemplo la **hormona de la muda** de los insectos, también llamada **ecdisona**, que regula el crecimiento y la metamorfosis en dichos animales. Esta hormona, que es un esteroide, se



Esquema de la acción de las hormonas que determinan la muda en los insectos.

produce en una glándula del tórax y se sabe que la función de esta glándula está activada por una neurosecreción procedente de los ganglios nerviosos, que producen la llamada **hormona de activación u hormona adenotropa**, que será la que estimule la elaboración de ecdisona.

En la determinación de las mudas larvarias actúa, además de la ecdisona, otra hormona, la hormona juvenil o **neotenina**, que se produce en unas glándulas denominadas «corpora allata».

CUARTA PARTE

NIVEL DE COMUNIDADES 



LOS ORGANISMOS Y EL AMBIENTE

Un organismo vivo que estuviese totalmente aislado de su entorno sería un ser inexistente, pues la vida, como hemos visto en las páginas anteriores, exige una constante relación del ser vivo con todo lo que está en contacto con él, es decir, con lo que los biólogos denominan el ambiente.

El ambiente de un ser vivo es todo aquello con que se relaciona, comenzando por el medio puramente físico que le sirve de soporte y en el que se desenvuelve su existencia, y terminando por los demás seres vivos, de su especie o de otras especies distintas, con los que entra en relación, sea para alimentarse de ellos o para servirles de alimento, sea para vivir a su amparo o para protegerse de ellos de alguna manera.

Como veremos más adelante, entre un ser vivo y su ambiente existe una auténtica relación mutua, y el ambiente influye sobre el organismo como éste sobre el ambiente. En consecuencia, el estudio de estas relaciones mutuas es del máximo interés, ya que la realidad actual del mundo es el resultado de la constante interacción entre los organismos y su ambiente.

De estos problemas se ocupa una parte de la Biología de suma actualidad, la Ecología.

◀ Robalito de cebra en su ambiente natural.

LA ECOLOGIA

La ecología se puede estudiar bajo tres puntos de vista, según el sujeto biológico, la **ecología del individuo**, la **ecología de la población** y la **ecología de la comunidad**.

Bajo el primer enfoque, la ecología se limita al estudio de un individuo en relación con su ambiente, analizando sobre todo sus reacciones ante los factores inorgánicos del medio.

La ecología de la población estudia las relaciones mutuas entre los individuos de una población y las que mantienen con los individuos de otras poblaciones.

Por último, la ecología de las comunidades es una ciencia que estudia las complicadas interrelaciones entre las distintas poblaciones que conviven en un mismo ambiente biológico.

FACTORES ECOLOGICOS FISICOS

El ambiente físico en que los organismos viven tiene para ellos una triple significación, como **soporte**, como **fuente de determinados elementos químicos imprescindibles** y como **mantenedor de unas condiciones climáticas necesarias** para el mantenimiento de la vida.

Como soporte, muchos seres vivos utilizan el **suelo**, soporte sólido en el que, sobre todo la mayoría de los vegetales, se fijan permanentemente; otros organismos viven, en cambio, siempre sumergidos en el seno de las **aguas**, utilizando, pues, un medio líquido como soporte, e incluso hay muchos organismos que utilizan el **aire** para trasladarse, o para que floten en él sus esporas o sus semillas.

Un segundo aspecto es el medio ambiente como fuente de elementos químicos, como son el **oxígeno** del aire o el que se encuentra disuelto en las aguas, elemento que es consumido por todos aquellos organismos no anaerobios, y el **díóxido de carbono** de la atmósfera, imprescindible para los vegetales que realizan la fotosíntesis. En este aspecto, sin embargo, hay que subrayar la importancia de los **aportes minerales** que hace el **suelo** a las plantas, pues todos los iones inorgánicos que tan imprescindibles son en la vida de todos los organismos animales y vegetales provienen (con excepción del

nitrógeno, que puede tener otras procedencias) de los compuestos del suelo, a través de las raíces de los vegetales.

Por último, el ambiente proporciona aquellas **condiciones climáticas** imprescindibles para la vida, entre las cuales se encuentran dos importantes aportes de energía, como son la **luz** y la **temperatura**.

La **luz** constituye la mayor fuente de energía que recibe el mundo orgánico. Como ya sabemos, todos los organismos, a excepción de algunas bacterias quimiosintéticas que utilizan la energía de reacciones inorgánicas de oxidación, obtienen su energía directa o indirectamente de la luz solar. Especialmente todas las plantas utilizan la energía solar para la fotosíntesis, resultando así la luz un factor ecológico de una importancia excepcional. Pero como también la luz tiene un efecto sobre el crecimiento de las plantas y sobre la síntesis de la clorofila, este factor ecológico determina, según su intensidad o su periodicidad, variaciones importantes en muchos vegetales, convirtiéndose en un agente morfogenético.

En cuanto a los animales, la luz hace posible, sobre todo en los animales superiores, el funcionamiento de los órganos visuales, por lo que su importancia en la vida del animal es decisiva.

La **temperatura** es, si cabe, un factor ecológico de mayor importancia que la luz. Se sabe, en efecto, que las reacciones químicas catalizadas por enzimas que constituyen el soporte de la vida, no pueden realizarse más que en una estrecha gama de temperaturas, fuera de las cuales no existe la posibilidad de una vida activa.

Para todos los organismos existen una temperatura **máxima** y una temperatura **mínima**, más allá de cuyos límites no pueden vivir y desarrollarse, y una temperatura **óptima** para su desarrollo.

Sin embargo, hay que decir que las distintas funciones pueden tener, sobre todo en las plantas, diferentes temperaturas óptimas, y que los organismos suelen estar en posesión de diversos mecanismos fisiológicos para protegerlos de las temperaturas extremas. Uno de estos mecanismos, muy difundido, es la **deseccación** en ciertas condiciones de algunos órganos u organismos completos, lo que les confiere una singular pro-

tección. Así, las semillas de algunos vegetales, que soportan temperaturas cercanas al cero absoluto, y las esporas de las bacterias, que pueden resistir durante varios minutos la temperatura de ebullición del agua sin detrimento de su vitalidad.

En los animales, según la dependencia o independencia de las temperaturas ambientales, se distinguen los **homeotermos** y los **poliquillotermos**; los **homeotermos** tienen unos dispositivos de regulación que les permiten tener el medio interno a una **temperatura constante**, lo cual es evidentemente una ventaja para las células, cuyas reacciones enzimáticas se realizan siempre a la misma temperatura, haciéndose así las actividades del animal independientes de las variaciones climatológicas. En los **poliquillotermos**, por el contrario, las células del cuerpo están a la **temperatura del ambiente**, variando la velocidad de sus reacciones enzimáticas celulares al compás de los cambios de la temperatura del exterior del cuerpo.

Por último, uno de los factores climáticos más importantes para el mantenimiento de la vida es el agua, que siempre proviene del ambiente mismo.

El agua es un **factor ecológico limitante**, de manera que en los ambientes que carecen de agua no puede existir forma alguna de vida.

Los organismos, sin embargo, pueden adaptarse a situaciones de **escasez de agua**, adaptaciones que, tanto en los vegetales como en los animales, toman la forma de órganos para el **almacenamiento del agua**, o la de estructuras para **impedir o dificultar su pérdida**.

En los vegetales son órganos de almacenamiento de agua las gruesas hojas de las plantas de climas desérticos; y mecanismos para impedir las excesivas pérdidas hídricas, las epidermis gruesas, las capas de ceras sobre la epidermis, los pelos y la reducción del número de los estomas, así como la disminución de las superficies de evaporación que reduce las hojas a la forma de espinas.

En los animales hay también muchos mecanismos para impedir la pérdida de agua por evaporación, existentes en los tegumentos de los animales terrestres, en los que hay estratos impermeables superficiales, como capas córneas, escamas o capas de quitina, o bien están bañados por líquidos ricos



Adaptación a la sequedad. Plantas carnosas con espinas.



Adaptación a la sequedad. Reptil con gruesas escamas.

en mucina, que se evaporan muy difícilmente, como ocurre en los tegumentos de muchos invertebrados terrestres, como lombrices de tierra o caracoles.

Por último, para evitar las pérdidas de agua en los lugares secos, existen también en plantas y animales ciertos comportamientos fisiológicos que impiden dichas pérdidas, como la regulación del cierre de los estomas de las hojas o los hábitos subterráneos de muchos invertebrados del suelo.

LAS ASOCIACIONES DE ORGANISMOS

Raras veces un organismo vive aislado de los organismos de su propia especie o de especies de alguna manera relacionadas con su propia vida. De ordinario, dichos organismos viven en íntima relación con sus propios congéneres y con otros de otras especies y estas relaciones no suelen ser casuales, sino determinadas por ciertas circunstancias que pueden ser muy variadas. Es, pues, una parte muy importante de la ecología el estudio de las **asociaciones** de unos organismos con otros.

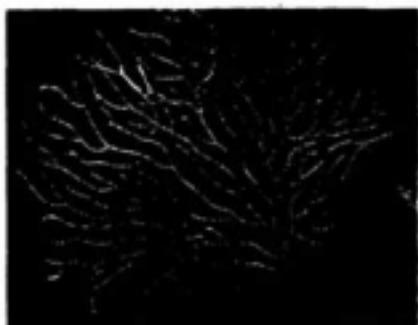
En principio, se puede distinguir entre asociaciones de individuos de la **misma especie** y asociaciones de individuos de **especies distintas**.

ASOCIACIONES ENTRE INDIVIDUOS DE LA MISMA ESPECIE

Las asociaciones entre individuos de la misma especie que constituyen la unidad fundamental desde el punto de vista



Familia de babuinos.



Colonia de hidrozoos (gorgonias).

ecológico son las **poblaciones**, o conjuntos de individuos que ocupan un determinado territorio y que se cruzan entre ellos, de modo que sus descendientes forman, a su vez, parte de la misma población.

Una población es, pues, una **unidad biológica**, cuya **estructura** está constituida por el conjunto de sus miembros y su distribución por edades, sexos, etc.

La población tiene unos **límites** y una **estructura dinámicos**, siendo éstos, en suma, el resultado de un equilibrio entre el incremento de sus miembros por **nacimiento** o **inmigración** y la pérdida de los mismos por **muerte** o por **emigración**. Más adelante veremos cómo la estructura de las poblaciones puede cambiar y cómo estos cambios pueden ser estudiados teniendo en cuenta las características genéticas de los componentes de la población en su conjunto, es decir, teniendo en cuenta la **genética de la población**.

Entre los vegetales sucede frecuentemente que varias poblaciones conviven en el mismo territorio, formando las llamadas **asociaciones vegetales**, de cuyo estudio está a cargo la ciencia denominada **fitosociología**.

En los animales, en el interior de las poblaciones caben distintas relaciones, de las cuales hay algunas de gran importancia ecológica.

En primer lugar, caben las **asociaciones familiares**, que comportan unas relaciones entre los individuos masculinos y los femeninos para el acoplamiento y para la cría de la prole, en los casos en que estas relaciones son las más complicadas,



Sociedad de abejas.



Reunión de aves marinas.

y que se reducen a la simple aproximación sexual y la puesta en otros casos. Incluso existen animales acuáticos en los que no hay aproximación entre machos y hembras, liberándose los gametos al agua ambiente, lo que también suele suceder en el caso de los animales acuáticos hermafroditas.

En el caso de los vertebrados, se suelen formar auténticos grupos familiares, de una mayor o menor duración, que unas veces son familias **polígamias**, con un macho y varias hembras, y otras **monogamias**, con una pareja solamente.

Un caso particular de las relaciones con la prole es la **formación de colonias**, muy extendida entre los animales acuáticos inferiores, especialmente espongiarios y celentéreos, pero que se puede dar incluso en animales de organización tan elevada como los tunicados.

La organización colonial es más o menos **comunitaria**, habiendo colonias en que hay solamente una débil conexión material entre sus componentes, llegándose en cambio en otros casos a una estrecha continuidad anatómica y a la especialización de los distintos zoides de la colonia en distintas funciones, con lo que la colonia, desde el punto de vista funcional, es una unidad biológica más explícitamente individualizada que el mismo individuo.

Existe también otro tipo de asociaciones animales fuertemente comunitaria que son las **sociedades de insectos**.

En estas sociedades no existe una continuidad material, como en el caso de las colonias, pero sí una profunda especializa-

ción fisiológica, sobre todo desde el punto de vista reproductor, puesta esta misión está confiada exclusivamente a algunos individuos de la sociedad.

Por último, se producen frecuentemente entre los animales unas **asociaciones temporales** de muchos individuos, que tienen una significación ecológica muy variada. En unos casos, se trata exclusivamente de reuniones de tipo **trófico**, como en el caso de muchos peces que viven juntos en grandes bancos, reunidos por la abundancia de plancton; en otros, se trata de bandadas que se reúnen para realizar juntos las **emigraciones estacionales**, como suele suceder en las aves emigrantes; en otros casos, los animales se agrupan para **dormir** en los lugares adecuados, como los murciélagos en las cuevas. En los mamíferos es frecuente que se reúnan grupos de animales para **cazar** juntos (lobos) o para la **defensa** en común (grandes rumiantes) y en estos casos hay una rudimentaria organización social, con un miembro del grupo dirigiendo los movimientos del conjunto.

ASOCIACIONES ENTRE INDIVIDUOS DE DISTINTA ESPECIE

La relación más frecuente entre individuos de especies distintas suelen ser las de carácter **trófico** que se pueden observar en los animales.

Efectivamente (y dejando aparte los animales herbívoros, o en general vegetarianos, así como los que se alimentan de cadáveres u otros restos orgánicos), en el caso de los animales que se alimentan de otros animales (carnívoros), la relación más



Un animal típicamente carnívoro: el león.

elemental entre unas especies y otras es la **depredación**, actividad fundamental para la cual existe una gran cantidad de mecanismos adaptativos, unas veces morfológicos (garras, muelas carníceras, picos, etc.) y otras veces fisiológicos o de comportamiento (venenos de artrópodos, telas de arañas, hábitos nocturnos, etc.).

Por último, hay que mencionar también unas relaciones especiales entre organismos de distintas especies, que son principalmente el **inquilinismo**, el **comensalismo**, la **simbiosis** y el **parasitismo**.

El inquilinismo y el comensalismo son unas asociaciones en que se reúnen dos organismos, uno de los cuales se beneficia de la asociación, mientras que el otro no sale perjudicado. El beneficio en el inquilinismo radica en la protección material que uno de los asociados confiere al otro, el cual se refugia en su interior. Este fenómeno, en sentido general, es muy amplio, pues se puede considerar inquilinismo desde el caso del pez que se refugia en una holoturia, hasta el del ave que anida en la espesura del ramaje de un árbol; pero, de ordinario, el inquilinismo va casi siempre acompañado de **comensalismo**. Consiste éste en que el asociado que se beneficia aprovecha simultáneamente el refugio que le ofrece el otro asociado y los restos de su comida, y se puede observar en algunos protozoos que habitan diversas cavidades orgánicas de animales superiores sin causarles trastornos, como las llamadas opalinias en la cloaca de los anfibios.

La **simbiosis** es un fenómeno de una mayor singularidad biológica, pues supone una asociación de dos organismos en



Opalinas habitantes en la cloaca de un anfibio.



Un flagelado de los que habitan en el intestino de las termitas.

beneficio mutuo. El caso más conocido es el de los líquenes, plantas mixtas formadas por un hongo cuyos filamentos micelianos aprisionan a las células redondeadas de un alga unicelular. Estas últimas, gracias a la clorofila que poseen, sintetizan la materia orgánica necesaria para la nutrición de ambos organismos, mientras los filamentos fúngicos absorben de la atmósfera el agua necesaria y probablemente los elementos inorgánicos indispensables, de la roca o de otro cualquier soporte donde vive el liquen.

Es también muy conocida la simbiosis entre varios animales acuáticos (celentéreos, algunas especies de *Paramecium*) y ciertas algas unicelulares que reciben el nombre común de zooclorelas, debido al color verde que les confiere la clorofila que contienen. El animal que contiene al alga se beneficia sobre todo del oxígeno que ésta produce en la fotosíntesis, mientras que el vegetal se lucra de los compuestos nitrogenados que proceden de la alimentación carnívora del celentéreo o del ciliado.

Por último, es también un auténtico fenómeno de simbiosis la convivencia de ciertos flagelados en el intestino de las termitas, a las que confieren la ventaja de digerir para ellas la celulosa y la lignina que constituyen el principal material alimenticio de estos insectos, para cuya digestión sin embargo no poseen las enzimas adecuadas; los flagelados, por otra parte, se benefician de los alimentos de las termitas y también de su habitación en el intestino de dichos insectos.

Sin lugar a dudas, el **parasitismo** es un fenómeno de mucha más amplitud y difusión entre los seres vivos que los anteriores, ya que existen parásitos en prácticamente todos los grandes grupos vegetales y animales, y, sobre todo en estos últimos, existen incluso grupos completos formados enteramente por formas parásitas.

La definición clásica del parasitismo es la de una relación más o menos permanente y obligatoria entre dos seres vivos, la cual es de tal naturaleza que uno de los dos organismos recibe un beneficio, mientras el otro se perjudica.

Igual que muchos otros conceptos biológicos, el de **parasitismo** adolece de cierta imprecisión. En muchos casos, porque no conocemos con exactitud el grado y la naturaleza de las relaciones entre los organismos asociados, y en otros casos porque, aunque conozcamos bien los hechos, su interpretación no es muy clara.

Hay que admitir en primer lugar que el fenómeno parasitario es un fenómeno de **adaptación**, que con toda seguridad ha surgido por los mismos mecanismos que las demás adaptaciones biológicas. Ahora bien, hoy se cree que el fenómeno de la adaptación, como nos enseñan los hechos de la genética de poblaciones y la interpretación que de ellos hacen las ideas actuales sobre la evolución, es un fenómeno **gradual**, que se realiza mediante múltiples y pequeñas variaciones, de las que resulta un proceso adaptativo de la población continuo y progresivo.

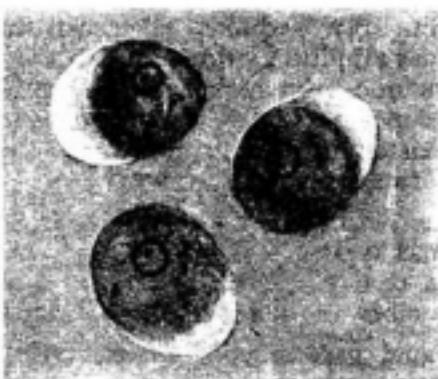
Por otra parte, el parasitismo es un fenómeno de **convergencia**, que ha aparecido en un sinfín de poblaciones que han hallado las circunstancias apropiadas para el desarrollo de la adaptación parasitaria, por lo cual hay que suponer que unos grupos han ido más lejos que otros en el camino evolutivo.

Por estas razones se admite en la actualidad que entre los fenómenos de inquilinismo, comensalismo, parasitismo y simbiosis no hay diferencias cualitativas, sino solamente distintos grados de **intimidad en la convivencia** y distintos grados de **adaptación**, la cual, además, adopta formas muy diferentes en unos tipos y en otros de parásitos.

Tradicionalmente se hace distinción entre **ectoparásitos** y **endoparásitos**, según que el parásito habite al exterior o en el interior del huésped u hospedador.



Ectoparásito: Mosquito picando.

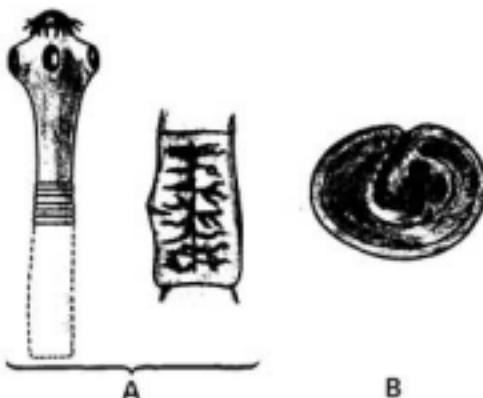


Endoparásito intestinal. Ameba parásita del hombre.

Los ectoparásitos son los que viven sobre la superficie del huésped de modo más o menos permanente, ocasionándole perjuicios al extraer de aquél su alimento y perforar el tegumento para obtenerlo. Este tipo de alimentación parasitaria es realmente una variante de la depredación, que se diferencia de la depredación «sensu stricto» en que el depredador es de menor tamaño que su víctima, por lo cual ésta en general puede seguir viviendo, lo que indudablemente es muy ventajoso para el ectoparásito. Esta circunstancia hace que la adaptación de los ectoparásitos radique principalmente en la boca y en los aparatos de fijación a la piel o a los pelos del huésped (mosquitos, piojos, sanguijuelas).

Los endoparásitos son los que habitan el interior del cuerpo del huésped, ya sea en el intestino o en otras cavidades (celozólicos), ya en la sangre (hemozoicos), ya en el interior de las mismas células (clitoxólicos).

Los endoparásitos pueden ocasionar lesiones muy variadas en el huésped, unas veces porque se alimentan de sus células y tejidos (ameba de la disentería tropical), otras porque le sustraen parte de su propio alimento (solitaria); otras, en fin, porque además de ejercer alguna de las acciones anteriores, producen ciertos productos tóxicos para el huésped (lombriz intestinal, plasmodio del paludismo).



Parásito heteroxeno: solitaria del hombre. A) Escólex y proglotis de la forma adulta en el intestino humano, B) Cisticerco o forma larvaria en el tejido conjuntivo del cerdo.

Las adaptaciones al endoparasitismo son muy variadas y en términos generales se puede decir que dichas adaptaciones se dirigen en principio a resolver el principal problema ecológico de los endoparásitos, esto es, el de lograr que sus descendientes puedan llegar a un nuevo huésped y habitarlo.

En algunos casos esto se ha logrado simplemente aumentando el número de huevos, con lo cual se aumentan las probabilidades de que uno de los innumerables descendientes pueda alcanzar a un huésped, como es el caso de la mayoría de los parásitos habitantes del tubo digestivo, cuya puerta de entrada habitual es la boca. Pero hay muchos casos en que el lugar de habitación del endoparásito es prácticamente inaccesible por las vías naturales, como es el caso, entre otros, de los parásitos de la sangre, y en estos casos se han desarrollado multitud de notables adaptaciones, de parásitos con ciclos biológicos complicados en los que se suceden varias fases o estadios larvarios, cada uno de ellos adaptado a un determinado animal.

Estos parásitos **heteroxenos** (que parasitan sucesivamente varios huéspedes) plantean problemas adaptativos distintos a los que surgen en relación con los **monoxenos** (los que parasitan un solo huésped), ya que la selección tiene que obrar no solamente sobre una sola forma del parásito, sino sobre las distintas formas de vida que adopta éste durante su complicado ciclo biológico.



ECOLOGIA DE LAS COMUNIDADES

Una comunidad está constituida por un conjunto de poblaciones que conviven ocupando un mismo ambiente ecológico, y que están mutuamente relacionadas desde muchos puntos de vista. Estas relaciones mutuas son muy importantes para todas las poblaciones componentes de la comunidad, ya que el volumen y la estructura de cada una de ellas están condicionados por el volumen y la estructura de las demás, pero también son importantes para la comunidad en su conjunto, que depende de las poblaciones que la forman. A su vez, la comunidad como tal está influida por los factores ecológicos físicos, aunque esta influencia se manifieste en mayor o menor grado en las diferentes comunidades. Una comunidad, pues, se puede considerar como una auténtica unidad biológica, cuyo estudio concierne a la ecología, y que es, además, la unidad biológica de nivel más elevado, cuya vida se compone de las relaciones entre las poblaciones, determinantes del equilibrio en que estas últimas se desenvuelven.

◀ Una comunidad vegetal: el bosque.

LA ESTRUCTURA DE LAS COMUNIDADES

Una **comunidad** o **biocenosis** es un conjunto de poblaciones de especies de animales y de plantas que conviven en un mismo ambiente. El ambiente ocupado por la biocenosis se denomina **biotopo**.

Si al conjunto de poblaciones que forman la comunidad, esto es a la biocenosis, añadimos los factores inorgánicos del biotopo, obtendremos el **ecosistema**, que es la unidad biológica funcional, puesto que el ambiente es la fuente principal de energía de toda comunidad.

En las comunidades, como en las demás unidades biológicas, es preciso estudiar la estructura y la función.

La **estructura** de una comunidad será la naturaleza, número, distribución, etc., de las especies y de los organismos que forman la biocenosis.

Estructura de la comunidad

En la determinación de la estructura de una comunidad, el **biotopo** tiene una importancia decisiva, ya que los factores ecológicos físicos son los que permiten la vida de las especies adaptadas a un determinado medio ambiente e impiden la de las especies no adaptadas.

Ahora bien, los biotopos son muy numerosos, debido a las condiciones geográficas de los diversos lugares de nuestro planeta. Sin embargo, se pueden reducir a cuatro tipos perfectamente diferenciados, a saber, el **medio terrestre**, el **mari-**
no, el **dulceacuícola** y el **de las aguas salobres**. Dentro de estos cuatro grandes biotopos, se pueden observar a su vez distintos biotopos, debidos fundamentalmente al clima, como son el bosque tropical o el desierto, pero que también pueden ser determinados por unas condiciones topográficas o de otra índole, como el ambiente de una cueva o la profundidad de una fosa marina.

LAS ESPECIES EN LA BIOCENOSIS

Toda biocenosis está poblada por un gran número de especies vegetales y animales. Sin embargo, no todas ellas tienen el mismo valor ecológico, existiendo algunas que por su abundan-



cia, por su porte o por ambas cosas, son tan características de una biocenosis determinada, que si fueran sustituidas por otras, dicha biocenosis quedaría transformada en otra distinta. Así, por ejemplo, el pino en un pinar, el haya en un hayedo. Estas especies se denominan **especies predominantes** de la biocenosis, y, sobre todo en las comunidades terrestres, suele tratarse de especies vegetales; sin embargo, hay que advertir que no siempre se trata de especies arbóreas, sino que pueden ser arbustivas (chaparral) o incluso herbáceas (pradera), y, sobre todo, que en las comunidades suele haber no una, sino varias especies vegetales predominantes, como se verá a continuación.

Esto es debido, fundamentalmente, al fenómeno de la **estratificación** de las comunidades vegetales, que es causa además de la estratificación de las poblaciones animales que en ellas viven constituyendo la misma biocenosis.

Así, por ejemplo, en un bosque podemos observar unos diversos estratos, de características distintas.

La parte más inferior de esta biocenosis, el **estrato edáfico**, está constituida por el suelo, entidad compleja de características fisicoquímicas peculiares, rico en humedad y en sales inorgánicas. En este estrato, como elementos vivos vegetales, están las raíces de las plantas y otros órganos subterráneos,

como rizomas o bulbos, y sobre todo en su horizonte superior, abundante en humus, abundan las bacterias, los mohos y otros microorganismos que descomponen los restos vegetales. Viven también en el suelo multitud de protozoos, algas cianoficeas, larvas de insectos, insectos adultos (hormigas), diminutos nemátodos, lombrices de tierra y hasta pequeños mamíferos, como los topos.

Por encima de éste está el **estrato herbáceo**, constituido por la parte aérea de las plantas herbáceas, más gran número de insectos y pequeños reptiles y mamíferos que de ellas se alimentan, como lagartos y lagartijas, culebras, musarañas, ratones de campo, etc.

Sigue a éste el **estrato arbustivo**, formado de plantas leñosas de pequeño porte, como retamas, romeros, tomillos, etc. y también gran número de insectos y líquenes que viven sobre ellas.

Finalmente, el **estrato arbóreo** está formado por los árboles de mayor o menor porte, en cuyas copas anidan las aves y en donde habitan algunos mamíferos arborícolas, como las ardillas.



Estratificación de una comunidad vegetal: 1. Estrato edáfico. 2. Estrato herbáceo. 3. Estrato arbustivo. 4. Estrato arbóreo.

Cada uno de estos estratos tiene unas condiciones ecológicas, siendo en ellos diferentes los factores climáticos, que determinan que en un mismo biotopo se puedan distinguir varios **microclimas** distintos.

Cada uno de estos microclimas determina unas condiciones especiales de habitabilidad, y como las condiciones exigidas por cada especie son distintas, un determinado organismo puede ocupar o no un lugar determinado en el estrato correspondiente. Este lugar se denomina el **habitat** de cada especie, y depende de las condiciones microclimáticas, pero también de las condiciones biológicas, es decir, de las especies que convivan con ella en el mismo habitat, puesto que de ordinario alguna de las otras especies le proporcionará el alimento necesario o cualquier otra condición igualmente precisa para su vida.

LIMITES DE LA BIOCENOSIS

Los **límites** entre dos biocenosis no suelen ser precisos. De ordinario, las comunidades vecinas se interpenetran, formando una zona intermedia en la cual se hallan plantas pertenecientes a ambas biocenosis. Estas zonas de frontera suelen ser más abundantes en vida animal y vegetal que las comunidades mismas, porque, además de los organismos de ambas biocenosis, poseen unos organismos peculiares que no se hallan ni en una ni en otra.



Límite entre dos biocenosis: zona de frontera entre el bosque y el matorral.

Además, la frontera entre dos comunidades suele ser una zona de tensión dinámica en la que una de las comunidades vaya desplazando a la otra, sobre todo cuando las condiciones físicas de los biotopos cambian. Así, por ejemplo, la pradera puede ir sustituyendo al bosque debido a la erosión de las aguas en el límite de aquella comunidad.

Por consiguiente, la zona más o menos amplia que separa a una de otra biocenosis, puede considerarse como una biocenosis distinta de sus vecinas, que recibe el nombre de **ecoton**, la cual a veces presenta características sumamente interesantes desde el punto de vista ecológico, como la zona de los márgenes de los ríos, situadas entre la biocenosis dulce-acuícola y la pradera o el bosque.

FUNCION DE LA BIOCENOSIS

Como queda dicho, las biocenosis tienen una estructura y una función; para conocer esta última, es necesario el estudio de las funciones de cada una de las especies que la constituyen, cuyo conjunto constituye, en suma, la **función de la biocenosis**.

En efecto, cada especie, en sus relaciones con el biotopo y con las demás especies de su misma biocenosis realiza una función o funciones determinadas; por ejemplo, una especie puede alimentarse de las larvas de otra especie, servir de alimento a otra y proporcionar las deyecciones en las cuales vivirá una tercera. Este conjunto de funciones constituyen el «papel» que juega dicha especie en la comunidad, el cual se denomina el **nicho ecológico** de la especie.

CAMBIOS EN LA BIOCENOSIS

Una circunstancia que hay que tener en cuenta cuando se estudia la función de una biocenosis, es que existen ciertas especies que pueden **cambiar de nicho ecológico** dentro de la misma biocenosis en una fase de su ciclo biológico para regresar a él en otra, o incluso en las mismas condiciones, abandonar una **biocenosis** para integrarse en otra. Es el caso de los insectos al pasar de la fase larvaria al estadio de adulto, momento en que suelen cambiar de función ecológica, pasando a ocupar un nuevo nicho, caso que se hace muy patente en



*Emigración de las aves.
Vías de emigración de la
golondrina europea, que
invierte en el continente
africano.*

el caso de las orugas de cualquier mariposa, que se alimentan activamente de hojas de vegetales y son pasto de muchas aves, pero que al convertirse en mariposas se limitan a libar en ciertos jugos y suelen servir de alimento, por ejemplo, a murciélagos.

Otras causas del abandono de unas biocenosis por otras son las emigraciones, como las de ciertas aves que abandonan en la primavera los climas cálidos donde han invernado para nidificar en otros más templados.

Estos cambios periódicos en las especies de una biocenosis, que pueden ser estacionales, diurnos o de alguna otra periodicidad relacionada con otros factores (alternancia de las mareas, por ejemplo), son la causa de que la función de las biocenosis esté sujeta a ciertos ritmos, que obligan a estudiarla en distintos momentos del año o del día.

REGULACION DE LAS POBLACIONES EN LA BIOCENOSIS

Un ecosistema se debe considerar, desde el punto de vista global, como un sistema transformador de materia gracias a la energía, lo mismo que un organismo aislado puede estu-

diarse desde este punto de vista. Así pues, el ecosistema exige un aporte de energía, la cual será distribuida a las distintas poblaciones que forman su biocenosis; de esta manera, las poblaciones transformarán la energía invirtiéndola en la síntesis de materiales orgánicos, disipándola en forma de calor, utilizándola para el movimiento de sus miembros, etc., lo que da como resultado, en principio, un **crecimiento de las poblaciones** que forman la biocenosis.

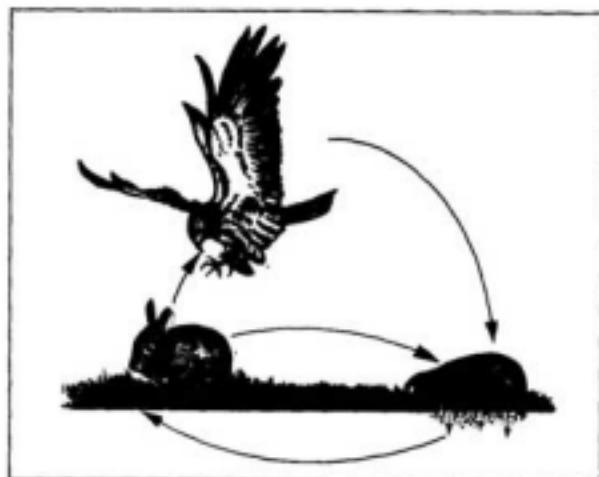
Este crecimiento, sin embargo, no es ilimitado, pues surgen en seguida unos factores limitantes para cada especie, que se llaman **factores de regulación**, la acción de los cuales conduce en último término a un **equilibrio entre las poblaciones**, por el cual los números de unas y otras se mantienen constantes a través del tiempo, determinando la estructura de la biocenosis. Este equilibrio dinámico, en el que los números de los miembros de la población son regulados por los de las demás, está sujeto a **fluctuaciones**, pudiendo, por ejemplo, aumentar en un determinado momento una cierta población, pero debido precisamente a los factores de regulación, el equilibrio queda restablecido al cabo de poco tiempo.

Estos factores de regulación son muy variados, pero principalmente son la **competencia por el alimento**, cuando éste es escaso, la **depredación** de unos animales sobre otros y los **parásitos**, que matan o perjudican la vitalidad de las poblaciones huéspedes.

FLUJO DE ENERGIA EN EL ECOSISTEMA

Todos los ecosistemas (con excepción de los escasos que dependen de microorganismos quimiosintéticos) reciben su energía de la **luz solar**, gracias a la captación que de ésta realizan los **vegetales verdes**. Estos vegetales, merced a dicha energía y a las sales inorgánicas que obtienen del medio ambiente (suelo, aguas marinas, aguas dulces), sintetizan materia orgánica. Su papel ecológico principal es la **síntesis** o producción de materia orgánica, por lo cual se les denomina **productores**.

De los productores se alimentan los **animales vegetarianos**, que transforman así la materia orgánica vegetal en materia orgánica animal, por lo que se les llama **consumidores** o **transformadores de primer orden**.



Flujo de energía en un ecosistema. Los vegetales (productores) son ingeridos por consumidores de primer orden y éstos por consumidores de segundo orden. Los cadáveres, deyecciones, secreciones, etc., de productores y consumidores son degradados a sustancias inorgánicas por los microorganismos reductores.

A su vez, los consumidores de primer orden sirven de alimento a los **carnívoros**, que reciben el nombre de **consumidores o transformadores de segundo orden**, y así sucesivamente, se forman unas **cadenas alimentarias** hasta los **consumidores de orden n.**

Por último, los cadáveres, deyecciones, desescamaciones y toda clase de restos muertos de animales y vegetales, son presa de los **microorganismos** que los descomponen, **reduciéndolos a materiales inorgánicos**, por lo que reciben el nombre de **reductores**. Estos organismos devuelven, pues, al mundo inorgánico los materiales que los productores obtuvieron de él, por lo que cierran así el ciclo material.

Realmente, las cosas no suceden de manera tan esquemática, pues por ejemplo un animal omnívoro puede ser un consumidor de primer orden cuando consume vegetales y de segundo orden cuando devora a un animal herbívoro. Las plantas carnívoras son incluso, al mismo tiempo, productores y consumidores. Por esta razón, dadas las complicadas relaciones alimentarias entre unos y otros organismos del ecosistema, algunos autores prefieren hablar de **redes alimentarias**.

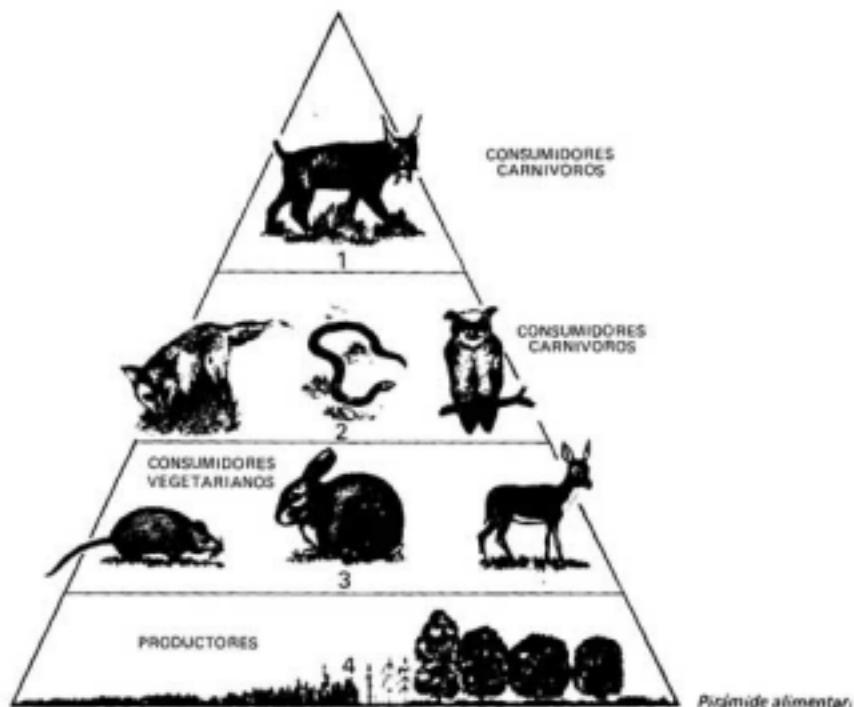
A lo largo de cada cadena alimentaria se establece un **flujo de la energía** captada por el productor, la cual es a su vez

utilizada por el consumidor de primer orden y así sucesivamente hasta llegar al último consumidor, siendo la energía aprovechada con menor eficacia cada vez que pasa de un organismo a otro.

PIRAMIDES ALIMENTARIAS

Las relaciones alimentarias y energéticas en un ecosistema, se pueden representar gráficamente por medio de las denominadas **pirámides alimentarias**, en cuya base están los productores y por encima de ellos los diversos consumidores estratificados ordenadamente.

Aunque teóricamente (y también en algunos casos reales) puede haber muchos niveles de consumidores, en la práctica la cadena alimentaria rara vez tiene más de cuatro eslabones, siendo lo más frecuente que sean tres o cuatro. Las pirámides alimentarias suelen contar con cuatro niveles, el inferior de los productores (vegetales), el siguiente de los consumidores vegetarianos y dos más de consumidores carnívoros.



si no intervienen factores externos que perturben este equilibrio.

Sin embargo, el ecosistema actual es una consecuencia de un fenómeno histórico de **población** de un determinado biotopo por los seres vivos, los cuales han ido lentamente colonizándolo, comenzando por los productores y sucediéndose una serie de poblaciones consumidoras superpuestas al nivel de los productores vegetales. Este fenómeno se denomina **sucesión ecológica**.

Una sucesión ecológica es, al principio, un ecosistema desequilibrado, al cual están afluviendo constantemente poblaciones procedentes de otros ecosistemas, las cuales encontrarán en éste mayores facilidades para su vida, al tener menor competencia y no estar todavía establecidos sus depredadores.

Cuando una sucesión ha alcanzado su estado de equilibrio se dice que ha alcanzado su **climax**, llamándose **preclimax** los estados anteriores.

Después de alcanzado su equilibrio (o a veces cuando aún está en fase de preclimax), los ecosistemas pueden cambiar al alterarse el equilibrio por la introducción de nuevos factores inorgánicos o biológicos. En condiciones naturales, los determinantes del cambio de los ecosistemas suelen ser lentos cambios **geológicos** o **climáticos**, como la colmatación de una laguna por los materiales de arrastre de los ríos o la instauración de un clima más seco por la alteración de la trayectoria de una corriente marina, etc. El resultado es que se inicia una nueva sucesión, que puede dar origen a un nuevo ecosistema más productivo (un bosque sustituye a una laguna) o menos productivo que el anterior (un desierto sustituye a una pradera).

En la actualidad, sin embargo, y debido a la elevada capacidad técnica del hombre, no acompañada frecuentemente de unos conocimientos ecológicos suficientes, son factores biológicos de origen humano (introducción de conejos en Australia, roturaciones y talas de bosques en Europa y Norteamérica) o físicos (contaminación del mar por productos petrolíferos) los que modifican los ecosistemas haciéndolos de ordinario mucho menos productivos e incluso, en ocasiones, **totalmente improductivos**.



Ecosistema totalmente degradado: paisaje desértico.

Dado que se calcula en unos 1.000 años el tiempo que en un biotopo tarda en establecerse un ecosistema en estado de climax, es fácil comprender el tremendo peligro que se cierne sobre la naturaleza si no se toman urgentes medidas para que sea respetado el equilibrio biológico en los ecosistemas actuales.

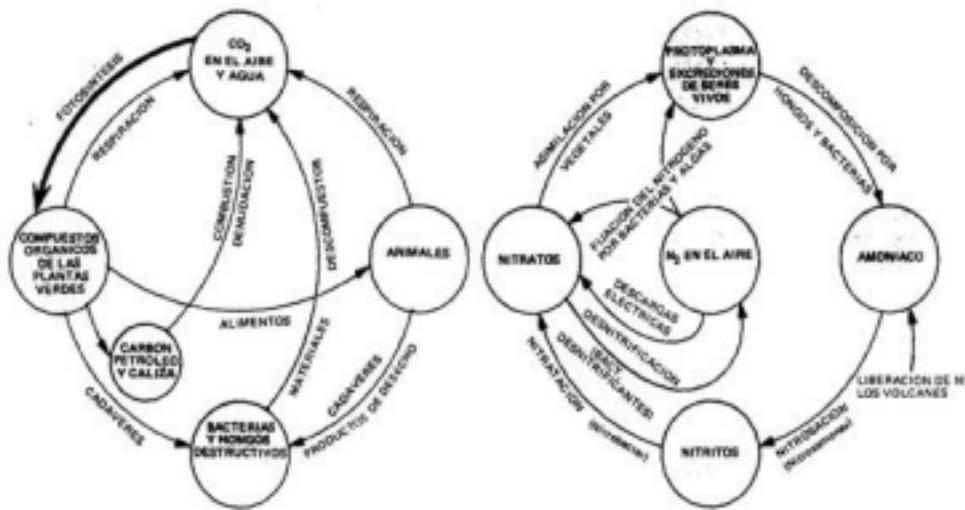
LOS CICLOS DE LOS ELEMENTOS

Si consideramos el planeta en su conjunto como un gran ecosistema, se nos aparecerá como un sistema cerrado, en el que no hay prácticamente más contacto con el exterior que la captación de energía del sol y la energía disipada.

En cambio, la materia del ecosistema es siempre la misma, y los mismos elementos químicos que los productores incorporan a la materia orgánica, vuelven a él a consecuencia de la acción de los reductores. Se trata, pues, de un fenómeno cíclico, en el que cada uno de los elementos tiene la posibilidad de retornar al cabo de algún tiempo al estado en que anteriormente se encontró, por lo que para cada elemento existe un ciclo peculiar.

Realmente los ciclos de todos los elementos tienen importancia biológica, pero cuantitativamente los más importantes son los de los elementos que forman la parte principal de la materia viva, es decir, el carbono, el oxígeno, el hidrógeno, el nitrógeno, el fósforo y el azufre.

Entre éstos hay algunos muy sencillos, como los del oxígeno y del hidrógeno, que se encuentran en cantidades muy grandes en la naturaleza y además en formas muy sencillas y fácilmente asequibles por los organismos.



Ciclo del carbono.

Ciclo del nitrógeno.

Otros, en cambio, son relativamente complicados, como el del carbono y el del nitrógeno; el primero, por su relativa escasez en forma de CO₂, única asimilable, y el segundo porque, a pesar de su gran abundancia en el aire, también escasea en formas asequibles a los organismos.

Por último, los ciclos del fósforo y del azufre son interesantes por la relativa escasez de estos elementos en el mundo inorgánico y por la intervención de microorganismos especiales en el ciclo de este último elemento.

QUINTA PARTE

EL MUNDO DE LOS

MICROORGANISMOS





LOS MICROORGANISMOS

La observación de los seres orgánicos presenta distintos aspectos, según su tamaño. Los animales y plantas grandes o de talla mediana se pueden observar a simple vista; los más pequeños, con ayuda de una lupa; existen algunos tan diminutos que se precisa del microscopio para su observación; por último, algunos ni siquiera son así perceptibles y para verlos necesitamos el empleo del microscopio electrónico. Existen, pues, diversos niveles de observación biológicos. En este capítulo estudiaremos aquellos organismos cuya observación corresponde a los niveles microscópico y electrónico.

Estos seres se denominan microorganismos o microbios y son, como queda dicho, invisibles a simple vista. No quiere esto decir, sin embargo, que no sea perceptible su presencia en los medios que habitan, sea por las alteraciones que determinan en estos medios (colores, olores, desprendimiento de gases, alteraciones físicas), o porque directamente se puedan observar las masas de microorganismos (colonias).

← La observación de los microorganismos exige el uso de los microscopios. En la fotografía se muestra un microscopio electrónico.

LOS MICROORGANISMOS

Como se verá más adelante, entre los microorganismos hay seres muy variados. Unos son **procariontes** y otros **eucariontes**, y aunque la mayoría de ellos son unicelulares, se consideran también como microorganismos algunos de ellos cuyo cuerpo está formado por varias células dispuestas en filamentos. Sin embargo, todos ellos tienen algunas propiedades comunes, que justifican su estudio conjunto en una ciencia que ha alcanzado últimamente una gran importancia, la **Microbiología**.

La característica fundamental de los microorganismos es que son de pequeño tamaño, el cual se puede cifrar como máximo, aproximadamente, en una décima de milímetro, aunque los hay mucho más pequeños.

Esta talla diminuta, efectivamente, confiere a los microorganismos unas propiedades comunes, derivadas del modo de realizarse el metabolismo en las células que los constituyen.

Por una parte, los microorganismos, debido a su exigua talla, tienen una relación muy grande entre la superficie y el volumen, tanto mayor cuanto menor es su tamaño, lo que quiere decir que, relativamente, la **superficie** de estos seres es verdaderamente **enorme** en relación a su volumen. Pero la superficie del microorganismo es el lugar material de sus intercambios químicos con el medio externo. Si este medio externo es suficientemente rico en materiales nutritivos, dichos materiales serán aprovechados con gran velocidad, y su **metabolismo** será **extraordinariamente rápido**, produciéndose así **un crecimiento y una multiplicación sumamente activos**.

La existencia de una superficie muy grande en contacto con el medio ambiente permite también una rápida difusión de los productos catabólicos al medio, de manera que éste último **se altera muy deprisa** en sus características químicas, tanto por los elementos nutritivos que toma de él el microorganismo, como por los productos de desecho que a él vierte.

Por otra parte, el pequeño tamaño hace posible con facilidad el **transporte** de los microorganismos de un lugar a otro, razón

por la que encontramos microorganismos en todos los medios naturales, tanto en las aguas como en la tierra o en el aire.

Podemos, pues, en razón de lo expuesto decir que los microorganismos son seres procariontes o eucariontes, sumamente pequeños, unicelulares o filamentosos, que se encuentran ampliamente difundidos en todos los medios naturales, que ostentan una gran velocidad de multiplicación y que ejercen una intensa acción química sobre el medio ambiente en que viven.

CLASES DE MICROORGANISMOS

Atendiendo a sus caracteres biológicos, los microorganismos se dividen en dos tipos, a saber: los microorganismos procariontes y los microorganismos eucariontes.

Los primeros son las cianoficeas, las bacterias, los micoplasmas y los virus. Todos ellos tienen una organización celular procarionte, que en algunos está reducida a sus caracteres más elementales.

Los segundos, formados por células eucariontes, son principalmente las levaduras, los mohos y muchos protozoos.

LAS CIANOFICEAS

Denominadas también algas verdeazuladas, las cianoficeas están constituidas por células procariontes aisladas u ordenadas en largos filamentos, que viven en las aguas dulces y en el suelo, aunque no es raro encontrarlas en aguas marinas. Su característica más acusada es la de poseer pigmentos asimiladores, por lo que realizan la fotosíntesis. Estos pigmentos se hallan en sus células dispuestos en unas membranas onduladas.



Una cianoficea filamentosa (*Nostoc*). Entre las células que forman el filamento se ven algunas células de mayor tamaño (hormogonios) que son formas de resistencia.

LAS BACTERIAS

Las bacterias son los microorganismos procariontes de más importancia, tanto por su amplia distribución como por la variedad de medios que colonizan, como por su trascendencia en relación con la vida de los demás seres vivos y con los ciclos de los elementos sobre la tierra.

De ordinario, las bacterias son formas **unicelulares**, aunque las hay también que forman filamentos más o menos ramificados. Algunas de ellas poseen **flagelos** que les sirven para desplazarse activamente en el seno de los líquidos en que habitan, mientras que otras son inmóviles.

Formas de bacterias

Las bacterias suelen ser rígidas y de formas sencillas, por lo cual no es posible identificarlas por su forma, como se hace con los demás seres vivos. En efecto, el enorme número de especies bacterianas se limita a adoptar cinco tipos morfológicos, a saber: los **cocos**, de forma más o menos esférica; los **bacilos**, de forma de bastón; los **vibrios**, de forma de varilla curvada; los **espirilos**, de forma de sacacorchos; y las **bacterias filamentosas**, cuyas células se agrupan en filamentos más o menos ramificados.

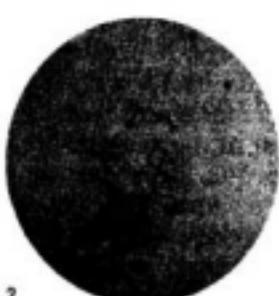
Los cocos pueden presentarse aislados o dispuestos en parejas (**diplococos**), en cadenas o rosarios más o menos largos (**estreptococos**) o en grupos más o menos vagamente parecidos a un racimo de uvas (**estafilococos**).

También los bacilos pueden estar aislados o agrupados formando cadenas (**estreptobacilos**) o pequeños grupos de bacilos paralelos (**bacilos en empalizada**).

Ya que la forma es un criterio muy vago para reconocer las especies bacterianas, los bacteriólogos las identifican mediante su **cultivo** dentro de unos tubos en el laboratorio y observando la acción química que determinan sobre diversas sustancias que se añaden a dichos tubos de cultivo.



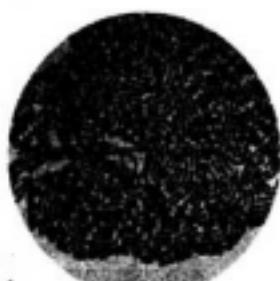
1



2



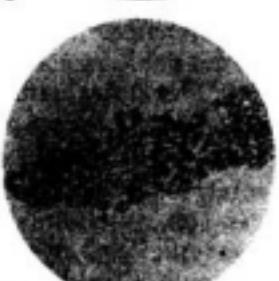
3



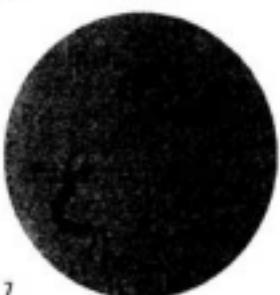
4



5



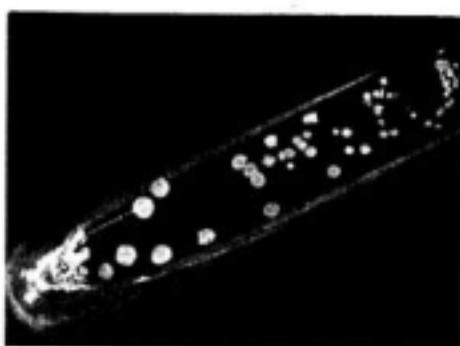
6



7

Tipos de bacterias
(1) Diplococo,
(2) Estreptococo,
(3) Estafilococo.

(4) Estreptobacilos
(5) Bacilos en empalizada.
(6) Vibrio.
(7) Espirito (con flagelos).



Un tubo de cultivos en el que se pueden observar varias colonias bacterianas.

Reproducción bacteriana

Las bacterias se reproducen, de ordinario, por **escisión binaria**, esto es, dividiéndose cada bacteria en dos bacterias hijas iguales. Cuando las condiciones ambientales son favorables, las bacterias se reproducen muy rápidamente, aumentando en progresión geométrica, lo que significa que en pocas horas pueden los descendientes de una sola bacteria alcanzar un número realmente prodigioso; en la práctica, sin embargo, este crecimiento suele estar limitado por el agotamiento del medio nutritivo, que impide reproducirse indefinidamente a las sucesivas generaciones bacterianas en número creciente.

Esporas

Ciertas bacterias pueden, en determinadas condiciones ambientales, formar **esporas**, esto es, condensar su citoplasma en el interior de una pared celular que se forma a este fin. Las esporas son generalmente esféricas (aunque las bacterias vegetativas que les han dado origen sean bacilares) y resisten la desecación. Cuando un material orgánico infectado por bacterias productoras de esporas se seca, éstas pueden ser transportadas por el aire a muy largas distancias; una vez en condiciones favorables de ambiente y humedad, la espora germina, originando de nuevo una bacteria vegetativa que se reproducirá, dando lugar a una nueva población bacteriana.



Bacilo del tifano con sus esporas.

Tipos biológicos de bacterias

Las bacterias que mayor importancia tienen para el hombre son las que determinan, en la especie humana y en los animales, enfermedades infecciosas. Por esa razón son las más conocidas.

Sin embargo, la inmensa mayoría de las bacterias no son causa de enfermedades y su vida se desenvuelve de modos muy variados. En relación con estos modos de vida podemos dividir las bacterias en los siguientes tipos: **autótrofas, saprofitas, simbióticas y parásitas.**

Bacterias autótrofas

Son bacterias capaces de **asimilar el CO₂ atmosférico**, al igual que lo hacen las plantas verdes.

La incorporación de CO₂ a la materia orgánica del citoplasma comprende una serie de reacciones que requieren la **absorción de energía**. Ahora bien, las plantas verdes obtienen dicha energía de la luz, mientras que las bacterias autótrofas pueden obtenerla de dos maneras distintas: de la luz, como las plantas verdes (**bacterias fotoautótrofas**), o de ciertas reacciones químicas de oxidación (**bacterias quimioautótrofas**).

Las **bacterias fotoautótrofas** son las **bacterias verdes**, que poseen un pigmento clorofílico y las **bacterias purpúreas**, provistas también de un pigmento clorofílico, pero enmascarado por la presencia de un pigmento carotinoide, la bacteriopurpurina.

Las **bacterias quimioautótrofas** se dividen en varios grupos, según sea la reacción química que determina y que les sirve como fuente de energía. Las más importantes son las **bacterias nitrificantes** del suelo, que oxidan las sales amoniacales a nitritos y los nitritos a nitratos, y las **bacterias ferrugíneas**, que oxidan el carbonato ferroso a hidróxido férrico.

Bacterias saprofitas

Son las bacterias que determinan la **descomposición** de los materiales orgánicos. Esta importante misión es también desempeñada por otros microorganismos, entre los cuales figuran principalmente los hongos, pero la parte más importante es llevada a cabo por las bacterias.

Aunque la descomposición de los restos orgánicos es un proceso muy complejo, suele considerarse «a grosso modo» como formado por dos tipos de procesos, la descomposición de glucidos y lípidos o **fermentación**, y la descomposición de prótidos o **putrefacción**. Ambos procesos son llevados a cabo ordinariamente por distintas especies bacterianas.

Bacterias simbióticas

Ciertas bacterias viven en simbiosis con organismos superiores, beneficiándose del ambiente y de la protección que les ofrece el organismo, el cual, a su vez, se aprovecha de las actividades químicas de las bacterias.

Anteriormente hemos visto ya ejemplos de los casos más conocidos, a saber, **las bacterias de la panza de los rumiantes**, que digieren la celulosa en beneficio de su huésped; **las de nuestro intestino**, que sintetizan vitaminas; y **las bacterias radicícolas de las leguminosas**, que fijan el nitrógeno del aire en forma de nitrógeno asimilable por la planta.

Bacterias parásitas

Estas bacterias viven en el interior de los seres vivos, beneficiándose del ambiente favorable y alimentándose a expensas de los alimentos, las excreciones o del cuerpo mismo del huésped.

De ordinario se denominan parásitas todas las bacterias que habitan en el cuerpo de los animales, aunque probablemente muchas de ellas no ocasionen perjuicio alguno al huésped, por lo que realmente se trata de bacterias comensales, que viven como saprofitas. En cambio, las hay que positivamente perjudican al huésped, determinando en éste el estado de enfermedad: son las bacterias patógenas.

LOS MICOPLASMAS

Son estos unos microorganismos muy parecidos a las bacterias en su organización general, por lo que se les puede considerar como tales. Sin embargo, existe una característica diferencial, y es la carencia en los micoplasmas de una pared celular rígida.

Debido a esta circunstancia, estos microorganismos son flexibles y delicados, y suelen ser de cultivo más difícil que las bacterias.

Los micoplasmas son parásitos y pueden originar enfermedades, como la llamada pleuropneumonía de los bóvidos.

LOS VIRUS

Existe aún otro tipo de microorganismos procariontes, cuya organización es tan elemental que puede dudarse en calificarla de «celular». Se trata de los **virus**.

Como ya dijimos, la estructura de los virus es muy sencilla, reduciéndose en la mayoría de ellos a una médula, formada por **ácidos nucleicos**, y una cubierta, la **cápsida**, formada por **proteínas**.

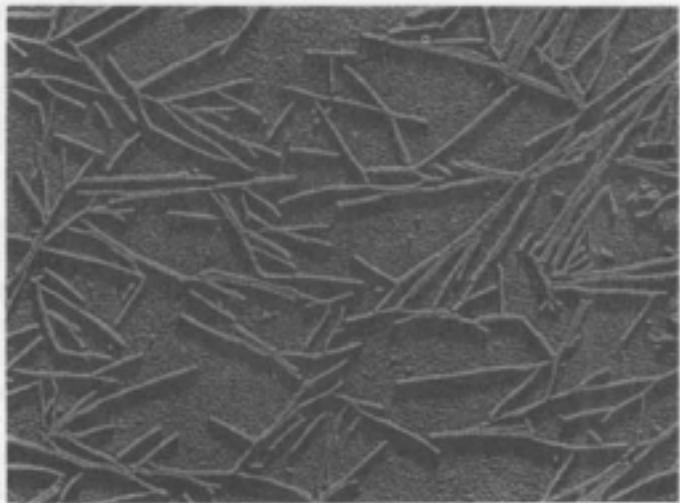
La ausencia de enzimas en los virus hace que éstos se comporten como partículas químicamente inertes, a no ser que se introduzcan en el interior de una célula viva. En este último caso, la dotación enzimática de la célula servirá para la duplicación del ácido nucleico de la médula del virus y para la síntesis de las proteínas de su cápsida, realizándose así la **multiplicación del virus**. Se produce así una situación biológica única, en la que un ente biológico necesita de las actividades enzimáticas de otro para su reproducción, razón por la cual existen muchos autores que niegan a los virus la cualidad de seres «vivos», fundándose en que la propiedad fundamental de la materia viva es la autorreproducción.

CLASES DE VIRUS

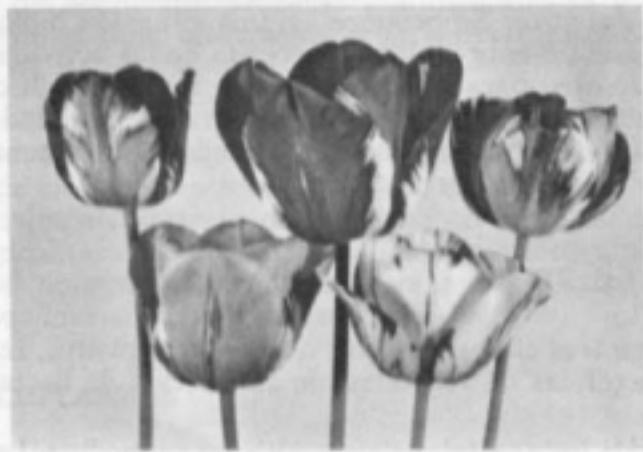
Se conocen tres clases de virus, que viven parásitos, respectivamente en células de vegetales, de animales y de bacterias.

Los virus de los vegetales tienen ARN en su médula. La cápsida está formada por unas unidades proteicas, los **capsómeros**, que se agrupan simétricamente alrededor del ácido nucleico, formando en conjunto una partícula vírica alargada, en forma de bastón, como en el **mosaico del tabaco**, y en otros formando un corpúsculo poliédrico, como en el del **mosaico amarillo del nabo**. Los virus de los vegetales son la causa de muchas enfermedades en las plantas, especialmente en las cultivadas.

Los virus de los animales tienen unos ARN y otros ADN en su médula. Tienen también una cápsida formada por capsómeros,



Partículas de virus del mosaico del tabaco.

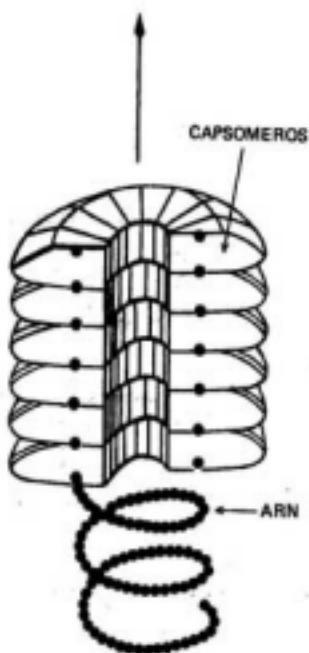


Tulipanes afectados por un virus que les produce unas bandas blancas características.

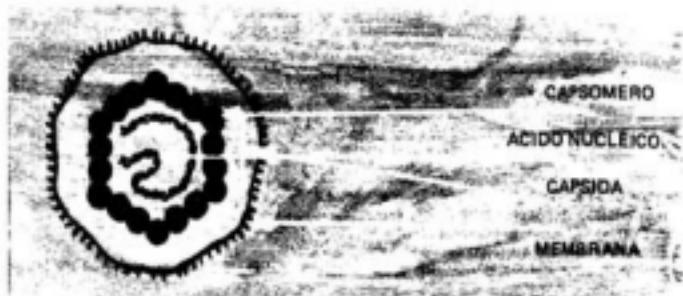
y también estos capsómeros se disponen de forma geométrica alrededor del ácido nucleico. Sin embargo, algunos de ellos son algo más complicados, y tienen al exterior de la cápsida una cubierta externa que se forma en ellos a expensas de la membrana celular de la célula que parasitizan.

Estos virus determinan en el hombre y en los animales un sinfín de enfermedades, como la poliomielitis, la hepatitis, la gripe, etc.

Por último, los virus de las bacterias, llamados también bacteriófagos o, simplemente, fagos, son los que tienen una estructura más complicada, pues su cápsida poliédrica está dotada de un apéndice o «cola» por medio del cual pasará el ácido



Esquema del virus del mosaico del tabaco. Los capsómeros se disponen helicalmente alrededor de la hélice de ARN, que se muestra desnuda en la parte inferior del dibujo.

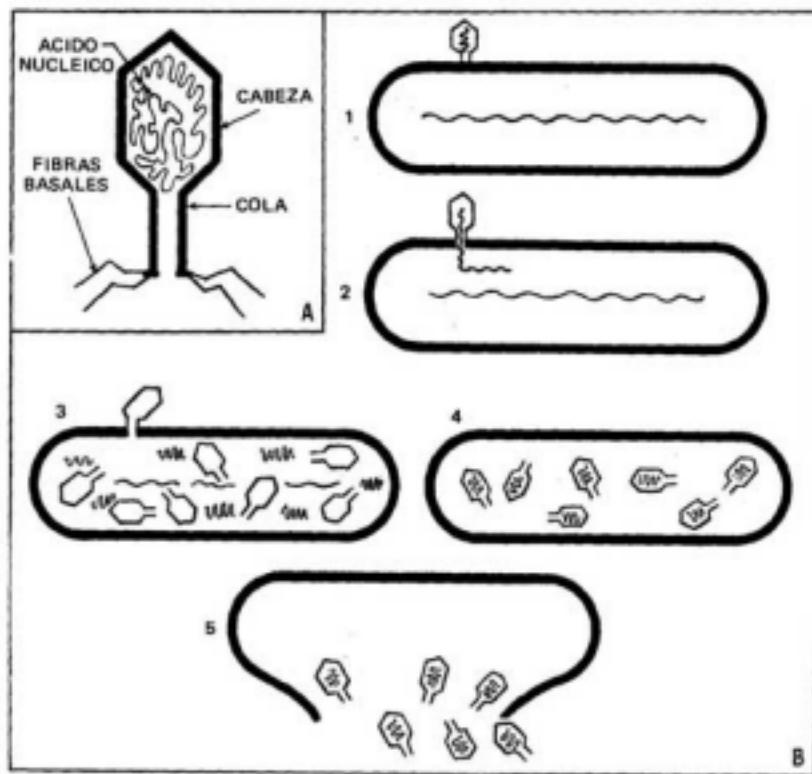


Esquema de un virus de animal.

nucleico a la bacteria huésped al principio de cada ciclo infeccioso.

La inmensa mayoría de los bacteriófagos tienen ADN en su médula, aunque se conocen algunos que poseen ARN.

Cuando un bacteriófago se fija a la pared de una bacteria, lo hace por medio de su «cola»; en ésta hay una enzima que disuelve la pared en ese punto y, una vez abierta esta puerta de entrada, el fago inyecta el ácido nucleico en la bacteria. A consecuencia de ello, el metabolismo de la bacteria queda tan



- Esquema de la estructura de un bacteriófago.
- Ciclo infeccioso del bacteriófago.
 - El fago se fija sobre la bacteria.
 - Entrada del ácido nucleico del fago.
 - Multiplicación del ácido nucleico y de la cápsida del fago. El ácido nucleico de la bacteria se degrada.
 - Formación de las partículas de fago.
 - Lisis de la bacteria y liberación de los fagos.

alterado que, en lugar de sintetizar sus propias proteínas y ácidos nucleicos, sintetiza los elementos constitutivos del fago en gran cantidad, produciéndose así gran cantidad de bacteriófagos. Una vez producidos éstos, la bacteria se rompe (se dice que «se lisa»), quedando liberados multitud de fagos por cada bacteria.

LAS LEVADURAS

Los microorganismos eucariontes más importantes son las levaduras.

En realidad, se trata de hongos ascomicetos, es decir, no son hongos muy primitivos, pero han degenerado por vivir saprofitos en soluciones nutritivas muy ricas.

Las levaduras son unicelulares y se multiplican principalmente por **gemmación**, con una gran rapidez si el ambiente es propicio. Estos microorganismos muestran una gran actividad en la fermentación de los azúcares y de otros materiales hidrocarbonados, en los que dan lugar a la fermentación alcohólica, con gran producción de etanol. Por esta razón se les utiliza industrialmente en la elaboración de **bebidas alcohólicas** a partir de zumos de frutas o de sustancias ricas en almidón, como el vino, la cerveza, la sidra, etc. Algunas levaduras pueden producir enfermedades al hombre y a los animales, como la denominada «muguet».



Levadura de cerveza.

LOS MOHOS

Los hongos constituyen unos organismos eucariontes vegetales muy variados, que se caracterizan por la ausencia de celulosa en su pared celular e igualmente por su carencia de pigmentos fotosintetizantes, razón por la cual no pueden vivir como autótrofos, sino como saprofitos o como parásitos.

En realidad, la mayoría de los hongos no pueden ser llamados microorganismos, pues suelen poseer unos cuerpos fructíferos grandes, a veces de muchos centímetros de diámetro, como la mayor parte de las setas.

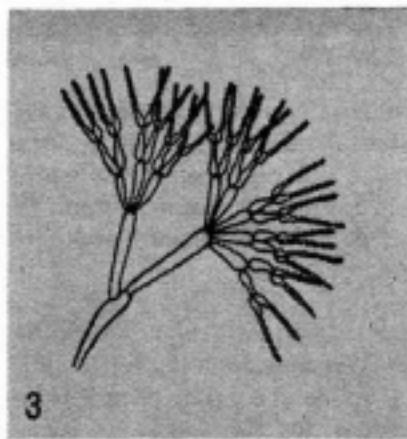
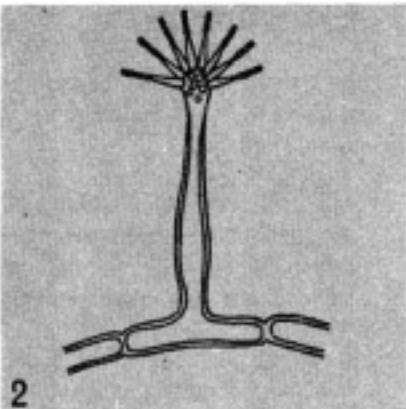
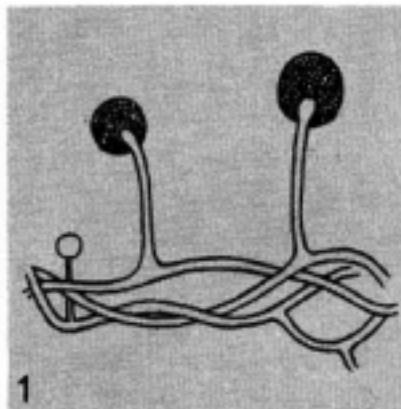
Sin embargo, la inmensa mayoría de los hongos tienen su parte vegetativa constituida por un **micelio** o conjunto de filamentos denominados **hifas**, los cuales pueden vivir al modo de los microorganismos en los medios nutritivos, en los que se reproducen muy rápidamente y sobre los que ejercen una intensa acción química.

Pues bien, los **mohos** son unos hongos pequeños que están formados casi exclusivamente por un micelio filamentoso y que crecen sobre las sustancias orgánicas de los alimentos, de la tierra, etc., cuando en el ambiente reina un grado de humedad lo suficientemente grande.

Aunque en muchos mohos existen procesos sexuales, el modo principal de reproducirse y difundirse los mohos es por **esporas**, que nacen dentro de unos esporangios, o por **conidios**, que son células resistentes que se forman en los extremos de hifas fértiles y que se desprenden de ellas para ser llevadas a otros lugares en los que germinarán, convirtiéndose en un nuevo moho.

Existen mohos en muchos grupos de hongos, por lo cual nos limitaremos a señalar algunos ejemplos de los más comunes.

Entre los **hongos inferiores** son muy comunes los mohos del pan (*Rhizopus*) y del estiércol (*Mucor*). Ambos géneros tienen un micelio blanquecino o grisáceo, del que se levantan unas hifas verticales, las **columnillas**, cada una de las cuales sostiene un **esporangio** negro, esférico, lleno de **esporas** asexuales que, transportadas por el viento cuando la pared del esporangio se desgarra, sirven para propagar la especie.



1. *Moho del pan (Mucor).*
2. *Aspergillus.*
3. *Penicillium.*

Entre los **hongos superiores**, los mohos más importantes son los de los géneros *Penicillium* y *Aspergillus*. Ambos géneros se reproducen principalmente por **conidios**, que nacen en el extremo de unos segmentos alargados, los **esterigmas**, cuya disposición es diferente en los distintos mohos. *Penicillium* ha alcanzado una merecida notoriedad por sintetizar el antibiótico penicilina; *Aspergillus* crece sobre los alimentos mal conservados y se utiliza industrialmente para la producción de ácido cítrico. Este último género puede, además, producir la invasión del aparato respiratorio en algunos animales domésticos.

LOS PROTOZOOS

Los protozoos son organismos eucariontes unicelulares, aunque en algunos de ellos la unidad funcional puede ser la colonia de células.

Los protozoos constituyen un grupo de organismos muy heterogéneo. De ordinario se consideran como animales, pero lo cierto es que muchos de ellos son autótrofos y pueden considerarse también como plantas.

Desde el punto de vista morfológico, unos protozoos están formados por células sumamente sencillas, aunque poseen todos los caracteres de las células eucariontes, mientras en otros la única célula constituyente ostenta una complicación estructural extraordinaria, mostrando algunos orgánulos que no se hallan en otras células animales o vegetales.

La heterogeneidad de los protozoos se hace también patente en cuanto a su tamaño, pues existen algunos cuya talla no llega a una micra, y otros que se miden por centímetros. Es pues, evidente que solamente en los protozoos de tamaño diminuto se darán aquellas circunstancias de orden fisiológico que permiten caracterizarlos como microorganismos.

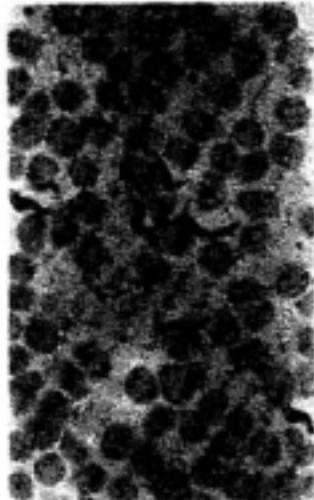
Los protozoos se dividen en cuatro grandes grupos, en todos los cuales existen especies que pueden considerarse como auténticos microorganismos en función de los criterios anteriormente expuestos: Son los **rizópodos**, los **flagelados**, los **esporozoos** y los **ciliados**.

Los **rizópodos** se mueven por medio de pseudópodos y entre ellos se hallan las **amebas**, de las que algunas son parásitas y aun patógenas para el hombre.

Los **flagelados** se mueven mediante uno o varios flagelos. Muchos de ellos tienen cloroplastos con clorofila y son autótrofos. Otros, en cambio, se alimentan al modo animal; algunos de éstos son también parásitos y patógenos, como las **lamblias** o los **trípanosomas**.



Un rizópodo: Ameba.



Un flagelado: Tripanosomas de la enfermedad del sueño en la sangre del hombre.



Un esporozoóo: Plasmodios del paludismo en glóbulos rojos humanos.



Un ciliado: el paramecio.

Los **esporozoos** son todos parásitos y generalmente diminutos. La mayoría son el origen de enfermedades en el hombre o en los animales, como los **plasmodios** del paludismo.

Los **ciliados**, por el contrario, son en su mayoría formas libres y de gran tamaño, en los cuales la evolución citológica de los protozoos ha conducido a formas de gran complicación estructural. Se caracterizan por la posesión de un enorme número de cilios, con ayuda de los cuales se mueven y capturan el alimento.



LOS MICROORGANISMOS Y LOS ANIMALES SUPERIORES

La gran mayoría de los microorganismos son heterótrofos, lo que equivale a decir que obtienen la energía necesaria para sus actividades biológicas a expensas de la oxidación de compuestos orgánicos.

Abora bien, la mayor parte de los compuestos de este tipo forma parte de la llamada biosfera, es decir, del conjunto de los seres vivos, plantas, animales y microorganismos que pueblan la Tierra. Por consiguiente, se puede afirmar que existen numerosas y muy variadas relaciones entre los microorganismos y los componentes de la biosfera.

En este capítulo, trataremos someramente de estas relaciones, singularmente de aquellas que los microorganismos mantienen con los animales superiores, que son de sumo interés, no solamente porque entre los animales superiores figuramos los seres humanos, sino también porque, en términos biológicos, estas relaciones adquieran unas modalidades muy específicas.

◀ Una grave enfermedad producida por microorganismos es la difteria o garrotilló; Francisco Goya pintó este cuadro en el que muestra un niño enfermo de esta dolencia, atendido por el médico.

LA FLORA NORMAL DE LOS ANIMALES

Los animales están sujetos a una continua contaminación microbiana, ya que en el ambiente con el que están en contacto existen millones de microorganismos. Por esta razón, existe un conjunto de microorganismos, de ordinario bacterias y levaduras, que viven habitualmente sobre la piel, sobre las mucosas y en el interior de las cavidades orgánicas que comunican con el exterior. Este conjunto de microorganismos se denomina **flora normal**, que es característica de cada animal y de cada órgano.

Así, por ejemplo, en la flora normal de la piel del hombre figura indefectiblemente el **estafilococo blanco**, el **colibacilo** en la de nuestro **intestino grueso** y el **estreptococo lácteo** en las **ubres de la vaca**, de donde pasa a la leche, en donde se encuentra siempre.

La flora normal no solamente es inofensiva, sino que puede ser indispensable para el animal que la lleva, de ordinario porque es **simbiótica** con él. Esto se hace especialmente evidente en el caso de la **flora de la panza de los rumiantes**, constituida por bacterias, levaduras y protozoos. Las acciones conjuntas de estos microorganismos tienen por resultado la síntesis de proteínas y la degradación de la celulosa que constituye gran parte de la dieta de aquellos herbívoros, de modo que les proporcionan materiales proteicos e hidratos de carbono fácilmente asequibles, pero también los microorganismos se benefician de las condiciones de humedad, temperatura y seguridad que reinan en la panza. Lo mismo hay que decir con respecto a nuestra **flora intestinal**, que vive y prospera en un ambiente cálido y húmedo, pero que al propio tiempo sintetiza vitaminas que son absorbidas por el hombre a través de la pared del intestino grueso.

LAS ENFERMEDADES INFECCIOSAS

Los microorganismos que viven en el cuerpo de los animales pueden en ocasiones lesionar los tejidos o perturbar de alguna manera las funciones orgánicas, determinando en ellos un estado anormal que se llama **enfermedad**, cuya importancia es

a veces escasa, pero que a veces puede incluso ocasionar la muerte del animal.

Hay que advertir que no siempre el estado de enfermedad se debe a la invasión del cuerpo por microorganismos, y que también se denominan «enfermedades» ciertos estados patológicos que no tienen nada que ver con aquéllos, como, por ejemplo, los síntomas debidos a la carencia de alguna vitamina en la dieta alimentaria. Sin embargo, la mayoría de las enfermedades son debidas a los microorganismos que «infectan» al cuerpo; por esta razón se denominan **enfermedades infecciosas**.

TRANSMISION DE LOS MICROORGANISMOS PATOGENOS

Los microorganismos productores de enfermedades pueden infectar el cuerpo de los animales sanos de maneras muy variadas.

De ordinario, los microorganismos patógenos proceden de otro individuo enfermo, generalmente de la misma especie, como sucede con la **gripe**, el **saramplón** o la **tos ferina**, aunque a veces la infección se contrae a partir de un animal de especie distinta, como es el caso de la **tuberculosis**, que los hombres suelen contraer de otro ser humano, pero que puede serles transmitida por las vacas enfermas.

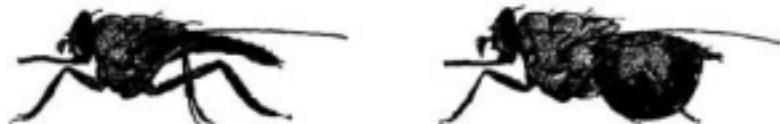
En ciertos casos el contagio es **directo**, por el contacto entre individuos, pero en la mayor parte de los casos es **indirecto**, siendo transportados los microorganismos patógenos de un enfermo a un sano por distintos objetos, como las **ropas**, **excrementos**, etc. En las enfermedades que se transmiten por el aparato respiratorio, basta la permanencia de los individuos sanos en la proximidad de los enfermos, ya que el agente causal (**virus de la gripe**, **bacilo tuberculoso**, etc.) se halla suspendido en las diminutas gotitas de saliva que se expulsan por la tos, el estornudo o la simple emisión de voz, y que por su poco peso permanecen en suspensión en la atmósfera durante algún tiempo, pudiendo ser inhaladas por el individuo sano.



Un mosquito anofeles, transmisor del paludismo (A); a su lado (B) un mosquito no transmisor (culexi). Obsérvese la diferencia en la postura de reposo de ambos mosquitos.

En las enfermedades infecciosas cuyos gérmenes están presentes en los **alimentos** o en el **agua** (**fiebre tifoidea**, **cólera**, algunas formas de **tuberculosis**), el contagio se produce al ingerir o beber estos productos que pueden estar contaminados por el contacto con las heces de los enfermos.

Una vía de contagio muy importante la constituyen los pequeños **artrópodos**, que de ordinario inoculan los microorganismos patógenos al picar a individuos sanos, como sucede con el virus de la **fiebre amarilla**, transmitido por ciertos mosquitos, y con los protozoos que causan el **paludismo** o la **enfermedad del sueño**, transmitidos, respectivamente, por los mosquitos anofeles y por las moscas tsé-tsé.



Mosca tsé-tsé, transmísora de la enfermedad del sueño, antes y después de tomar la sangre de un hombre.

Por último hay que mencionar el caso de aquellos microorganismos que por tener **esporas** resistentes pueden permanecer mucho tiempo en la tierra o en el polvo y cuyas esporas pueden ingresar en el organismo, germinar en él y determinar la enfermedad a favor de heridas que se ensucian con la tierra que contiene estas esporas. Este es el caso del **carbunco** que afecta de ordinario a las ovejas y del **tétanos** humano.

PATOGENICIDAD DE LOS MICROORGANISMOS

Los microorganismos pueden producir dos tipos de daños distintos a los animales. Unas veces, introduciéndose **en gran cantidad** en el cuerpo o **multiplicándose** en él con gran rapidez, perturban la vida de las células en que viven, alimentándose de ellas o de sus nutrientes. Otras veces, los daños ocasionados por los microorganismos son ocasionados por unas **toxinas** o venenos microbianos, que se difunden por el organismo perturbando el metabolismo de las células, incluso de aquellas que están muy distantes del lugar de la infección, ya que las toxinas son transportadas por la sangre.

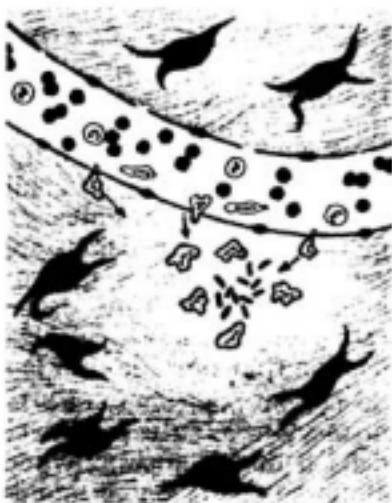
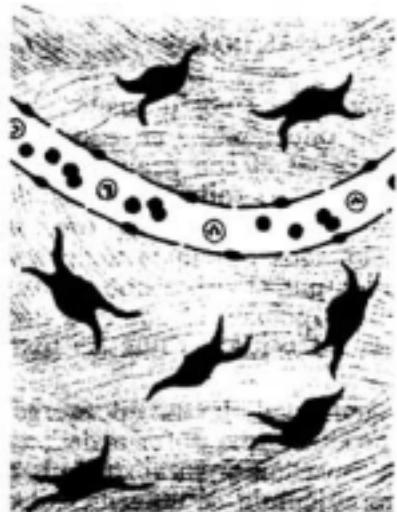
Se comprende, pues, que la **patogenicidad** de un microorganismo, o sea, su capacidad para producir una enfermedad, se deba a dos factores, su **poder de invasión** y su **toxicidad**, o a una combinación de ambos. Como ejemplo de enfermedades muy invasoras podemos citar el **carbunco** y la **viruela**, mientras, por ejemplo, la **difteria** y el **tétanos** son enfermedades cuyos gérmenes obran fundamentalmente en virtud de su toxicidad. Atendiendo a otro criterio, pueden distinguirse por una parte microorganismos que producen siempre **los mismos o parecidos síntomas**, sea cual fuere el sitio de entrada en el organismo, como el **bacilo tetánico**, cuya toxina produce siempre los mismos efectos en el sistema nervioso; de otra parte, están los microorganismos que producen **distintas enfermedades**, según sea su localización en el organismo, como, por ejemplo, el **estreptococo piogénico**, causante de las **anginas**, del **reumatismo articular**, de la **escarlatina** o de la **erisipela**.

DEFENSA DEL ORGANISMO

Ante la agresión de cualquier microorganismo, el cuerpo opone una serie de mecanismos que se oponen a la misma, y que se llaman **defensas orgánicas**. Estas defensas pueden clasificarse en **mecanismos de defensa pasiva, reacciones celulares y reacciones humorales**.

Mecanismos de defensa pasiva

Son **condiciones físicas y químicas** que impiden o dificultan la entrada de los microorganismos. Por ejemplo, la presencia de la piel recubriendo todo el cuerpo, la acidez del estómago,



Esquema del proceso de la inflamación.

A la izquierda, tejido conjuntivo normal.

A la derecha, tejido conjuntivo inflamado. Obsérvese: Mayor diámetro del capilar sanguíneo (vasodilatación); salida de los leucocitos hacia el lugar donde están las bacterias (diapedesis).

la presencia en el moco, saliva, lágrimas, etc., de la lisozima, enzima que impide el desarrollo de muchas bacterias, etc.

Reacciones celulares. La inflamación

Son reacciones en las que no sólo participan las células, sino todo el tejido afectado, aunque la participación celular es la más aparente. La reacción celular más importante es la denominada **inflamación**, que se puede observar, por ejemplo, cuando penetran bajo la piel bacterias patógenas a través de una herida.

Dos fenómenos principales suceden entonces. En primer lugar, en el lugar de la penetración bacteriana se produce una **vasodilatación** de los capilares sanguíneos, los cuales exudan abundante plasma sanguíneo. Por otra parte, salen también de dichos vasos gran cantidad de **leucocitos**, que se acumulan en el lugar de la agresión bacteriana, y también se movilizan ciertas células fijas del tejido conjuntivo (**histiocitos**), que acuden a dicho lugar. Ambas clases de células engloban con sus **pseudópodos** a las bacterias, y las digieren en sus **vacuolas digestivas**. Este fenómeno se llama **fagocitosis**.



Leucocitos que han fagocitado unas bacterias.

Ambos fenómenos colaboran a la defensa, ya que la vasodilatación determina un mayor aflujo de sangre, que a su vez significa una mayor cantidad de leucocitos extravasados y, por consiguiente, activos en el ataque a los microorganismos.

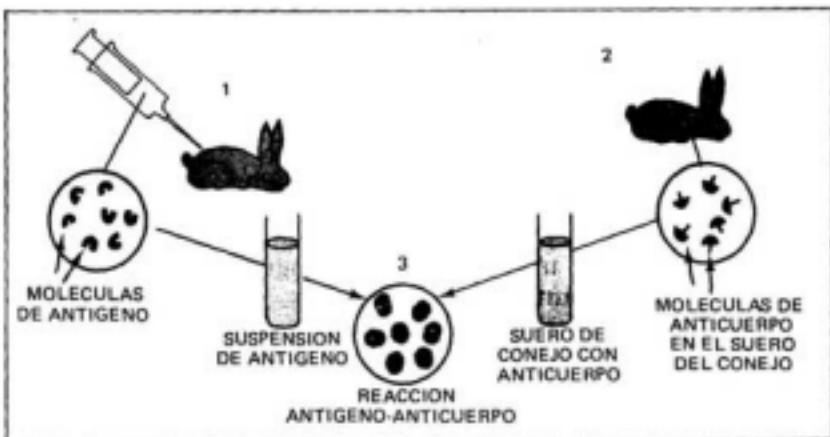
Reacciones humorales

Las sustancias orgánicas ajena que se introducen en la sangre o en los tejidos de los animales superiores modifican de alguna manera la composición química del medio interno. En muchos casos, a consecuencia de esta modificación, ciertas células del organismo reaccionan elaborando otras sustancias que tienden a oponerse a la acción de las primeras y que se combinan con ellas. A las sustancias que tienen la virtud de provocar dicha reacción se las llama **antígenos** y a las que se forman como respuesta a su entrada en el organismo, se las denomina **anticuerpos**.

Los antígenos y los anticuerpos se combinan entre sí mediante una **reacción específica**. Quiere esto decir que cada antígeno se corresponde exactamente con el anticuerpo a que da origen, de modo que sólo se combinan entre sí, y no cualquier antígeno con cualquier anticuerpo. Esta reacción se llama **reacción antigénica**.

La reacción antigénica se produce en los animales superiores sea cualquiera el origen del antígeno, pero en condiciones naturales, en la mayoría de los casos los antígenos no se pueden introducir en el cuerpo si no son transportados por microorganismos. Esta es la razón por la cual, la mayor parte de los co-

nocimientos generales sobre los antígenos y los anticuerpos han sido aportados por el estudio de los microorganismos patógenos.



Reacción antígeno-anticuerpo.

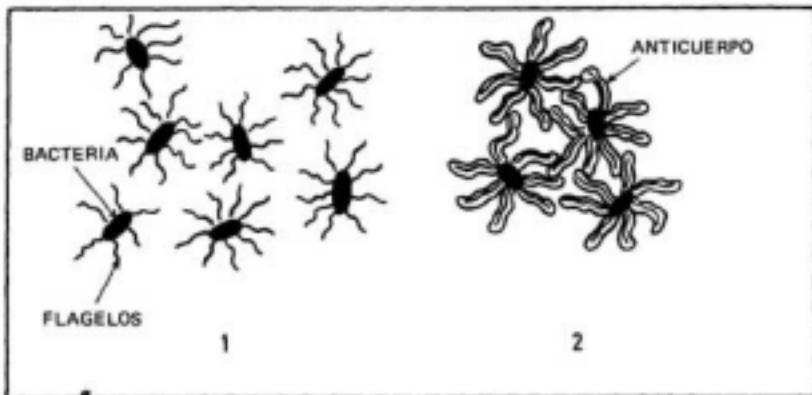
1. Inyección a un conejo de un antígeno.
2. Al cabo de algún tiempo, en la sangre del conejo aparece el anticuerpo correspondiente.
3. Mezclando la suspensión del anticuerpo con el suero del conejo, se combinan el antígeno y el anticuerpo.

Existe gran variedad de antígenos, pero los principales son los **polisacáridos** y las **proteínas**. Los anticuerpos son todos proteínas del tipo de las **globulinas** y el organismo los forma utilizando como materia prima las globulinas del plasma sanguíneo, especialmente un grupo de ellas que se designan con el nombre de γ -globulinas.

Ahora bien, los microorganismos, especialmente las bacterias, tienen muchas proteínas y polisacáridos formando parte de su pared celular, de sus flagelos y demás estructuras del exterior de su cuerpo. Son, pues, **portadores de antígenos** y determinan en consecuencia la aparición de anticuerpos en el suero sanguíneo.

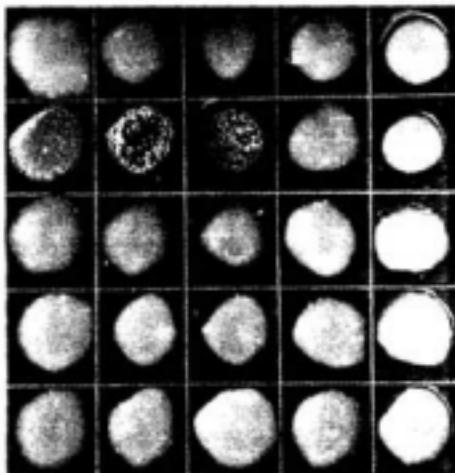
Se conocen varios tipos de anticuerpos, que son los siguientes:

Antitoxinas.—Aparecen en la sangre como respuesta a una **toxina** elaborada por un microorganismo, generalmente una bacteria. Las antitoxinas **neutralizan** a sus correspondientes toxinas y las hacen inocuas, es decir, no nocivas.



Esquema del mecanismo de la aglutinación.

1. Los flagelos de las bacterias contienen antígenos, los cuales son capaces de provocar la aparición de anticuerpos específicos en la sangre.
2. Mezclando el suero sanguíneo con las bacterias correspondientes, los anticuerpos se unen a los antígenos flagelares revestiendo a cada flagelo de una capa de anticuerpos. Los anticuerpos se unen entre sí, aglutinando unas bacterias con otras.



Fotografía de una prueba de aglutinación.

Se han mezclado suspensiones de una determinada bacteria con distintos sueros sanguíneos. Solamente hay aglutinación en los tres primeros sueros de la segunda fila, lo que indica que sólo en estos sueros existen los anticuerpos correspondientes a los antígenos de la bacteria en cuestión.

Aglutininas.—Aparecen en la sangre a consecuencia de la introducción en el organismo de ciertos tipos de células (generalmente bacterias). Cada aglutinina, puesta en contacto con las células responsables de su aparición, provoca la aglutinación de dichas células, es decir, su aglomeración en unos grumos característicos.

Precipitinas.—Suelen aparecer en respuesta a antígenos de naturaleza proteica. La reacción antígeno-anticuerpo es en este caso una precipitación de partículas de menor tamaño que en el caso anterior.

LUCHA CONTRA LOS MICROORGANISMOS PERJUDICIALES

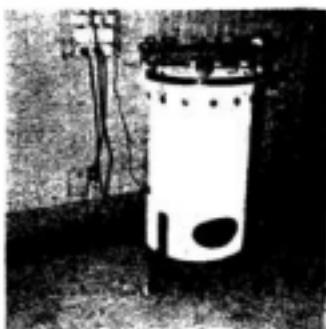
Aunque la mayor parte de los microorganismos no son nocivos para el hombre e incluso algunos de ellos, como se ha visto, son de tal modo útiles que los empleamos para producir las fermentaciones que deseamos, algunos de estos seres nos producen serios perjuicios, que nos obligan a luchar contra ellos.

Agentes antimicrobianos

Para abordar con éxito la lucha contra los microorganismos patógenos hay que conocer, en primer lugar, cuáles son los más eficaces agentes antimicrobianos, es decir, los que perjudican la vida de los microorganismos matándolos o impidiendo su reproducción. Estos agentes se pueden clasificar, según su acción, en agentes físicos, químicos y biológicos.

Agentes físicos

El calor.—Ya hemos dicho anteriormente que las elevadas temperaturas son incompatibles con la vida de las bacterias, como también lo son con la de los demás microorganismos. El calor, es decir, la elevada temperatura, por flameado, en el autoclave, o sencillamente por la ebullición de los productos u objetos que contienen microorganismos, destruye todos o al menos la mayor parte de estos seres.



Autoclave.

El frío.—Las bajas temperaturas suelen ser nocivas para la mayoría de los microorganismos. Algunos incluso mueren al ser sometidos a temperaturas vecinas de 0° C. Sin embargo, en la mayor parte de los casos los microorganismos sobreviven a estas temperaturas, aunque mientras éstas duran son incapaces de reproducirse.

Las radiaciones.—Determinadas radiaciones físicas, como los rayos ultravioleta y las radiaciones ⁸ producidas en las pilas atómicas, son causa de la muerte de los microorganismos.

Agentes químicos

Muchos productos químicos matan a los microorganismos y se denominan genéricamente **antisépticos**.

No se pueden establecer reglas generales sobre su acción, pues cada uno actúa de manera diversa desde el punto de vista químico. Los antisépticos más utilizados son el **alcohol**, la **tintura de yodo**, el **fenol**, el **sublimado**, la **mercromina**, etc.

Agentes biológicos

Se pueden denominar de tal forma una serie de agentes que actúan sobre los microorganismos, principalmente impidiendo su reproducción por interferir sus funciones biológicas normales. Esta acción sobre la reproducción microbiana se llama **bacteriostasis** en el caso de que afecte a las bacterias, que es lo más frecuente, y sus agentes se denominan **bacteriostáticos**.

Los principales son los **antibióticos**, sustancias producidas por ciertos organismos, especialmente hongos filamentosos.

Entre los antibióticos más importantes se pueden citar la penicillina, producida por el moho *Penicillium notatum*, que fue el primer antibiótico descubierto, hallazgo debido al gran microbiólogo inglés Alexander Fleming (1881-1955); son también dignos de mención la estreptomicina, que produce el actinomiceto *Streptomyces griseus*, y la terramicina, de *Streptomyces rimosus*.

LUCHA CONTRA LAS ENFERMEDADES INFECCIOSAS

Para librarse al hombre (o a los animales, si este es el caso) de las enfermedades infecciosas, podemos adoptar una serie de medidas de lucha que se pondrán todas en juego en el momento en que exista un peligro de enfermedad. Estas medidas pueden clasificarse sumariamente según se luche **directamente** contra el microorganismo en el enfermo, o se luche **indirectamente** para impedir que pueda invadir el cuerpo de los sanos. En general, las medidas de lucha directa son atributo del médico o del veterinario, mientras que la lucha indirecta es misión de los organismos de sanidad.

Lucha directa

La lucha contra el microorganismo en el hombre o en el animal afectados tiene como objetivo su **curación**, y las medidas que lleva consigo están generalmente comprendidas en el término de **quimioterapia**, es decir, la administración de productos químicos de eficacia curativa, bien por combatir el germen patógeno, o bien por fortalecer al enfermo mejorando su estado general.

Lucha indirecta

Las principales medidas preventivas contra los microorganismos patógenos son el **aislamiento** de los enfermos, los programas de **erradicación**, el desarrollo de la **inmunidad** de la población, el aumento del **nivel de vida** y la **educación sanitaria** de la población.



Alexander Fleming, descubridor de la penicilina.

Aislamiento

El **aislamiento** de los enfermos infecciosos es una práctica muy antigua, que ya se practicaba en tiempos bíblicos (los leprosos eran expulsados de la comunidad). Más tarde, y hasta hace poco tiempo, se practicaban medidas de **cuarentena** con los buques procedentes de puertos «sucios» con respecto a una determinada enfermedad (esto es, puertos en los que existía una determinada epidemia). En la actualidad, en los países civilizados, los enfermos infecciosos son aislados en **pabellones especiales** de los hospitales e incluso existen **residencias aisladas** para los pacientes de ciertas enfermedades (leproserías, sanatorios antituberculosos). El aislamiento, tal como hoy se practica, asegura un mejor y más especializado cuidado del enfermo infeccioso, al mismo tiempo que protege al resto de la población contra un posible contagio.

Erradicación

Con esta palabra se designa la **extirpación completa** («arrancar de raíz») de una enfermedad de un determinado país o comarca. En ocasiones es un método de lucha directa, como

se hace en los programas de la Organización Mundial de la Salud para terminar con la enfermedad llamada «pián» en las islas del Pacífico, que comprenden un **tratamiento completo e indiscriminado** de la población.

La erradicación de enfermedades que se transmiten **por medio de un animal vector**, intermediario entre sano y enfermo (el mosquito, en el caso de la fiebre amarilla o del paludismo), se verifica destruyendo a este vector. Así se ha conseguido la erradicación del paludismo en nuestro país, por el saneamiento de los terrenos pantanosos en los que vivían las larvas de los mosquitos transmisores de la enfermedad. Claro es que la erradicación ha ido aquí acompañada de una lucha directa en los enfermos humanos.

Inmunidad

Se denomina **inmunidad** al estado de un individuo que no contrae una determinada enfermedad cuando la contraen otros individuos que están sometidos a idénticas condiciones de contagio.

Clases de inmunidad

Atendiendo a su origen, la inmunidad puede ser **natural** o **adquirida**. Atendiendo a la manera de adquirirse, esta última puede ser **adquirida a consecuencia de una enfermedad** o **adquirida artificialmente**. Finalmente, si atendemos al mecanismo de producción de la inmunidad artificial, distinguiremos entre **inmunidad activa** y **pasiva**.

Inmunidad natural

Es la que se posee desde el nacimiento, es decir, que es innata. Puede haber una inmunidad natural **individual, de raza** o **de especie**.

Todos conocemos casos de **individuos** que en caso de epidemia, y sometidos a idénticas posibilidades de contagio que los demás, no adquieren la enfermedad; se dice que estos individuos son naturalmente inmunes a esta enfermedad.

Existen, además, ciertas **razas** que son inmunes a determinadas enfermedades, que afectan a individuos de otras razas, como algunas razas de corderos que son inmunes al carbunclo.

También existe una inmunidad de **especie**. El hombre no puede enfermar de la peste aviar, ni las gallinas de tétanos, por ejemplo.

Inmunidad adquirida

Esta inmunidad no se posee al nacer, sino se adquiere **en un momento determinado** de la vida del individuo. Una vez adquirida, la inmunidad puede ser sólida o duradera y el individuo continúa inmune durante toda su vida, o bien puede éste volver a ser susceptible de contraer la enfermedad pasado un cierto tiempo, durante el cual la inmunidad va desapareciendo lentamente.

Inmunidad adquirida a consecuencia del padecimiento de una enfermedad

Este es, sin duda, el modo más frecuente de adquirirse la inmunidad, sobre todo en las enfermedades de la infancia. Todo el mundo sabe que el sarampión o la tos ferina no se padecen más que una vez. Esto sucede porque, a consecuencia de haber padecido la enfermedad, en el individuo se ha implantado la inmunidad contra esa determinada enfermedad y aunque más tarde se someta a la posibilidad de un contagio, el organismo vence al germe que entre en él.

Inmunidad adquirida artificialmente

El conocimiento empírico de que quien sana de ciertas enfermedades queda inmune frente a las mismas, hizo pensar en la posibilidad de inmunizar artificialmente a los individuos haciéndoles padecer una enfermedad leve, pero que protegiera de otra más grave.

Este fue el caso de la **viruela**, enfermedad que en siglos pasados causaba verdaderos estragos, pero que inmuniza al que se cura de ella de tal manera que ya no vuelve a padecerla. Como había ciertas epidemias de viruela en que los casos eran relati-

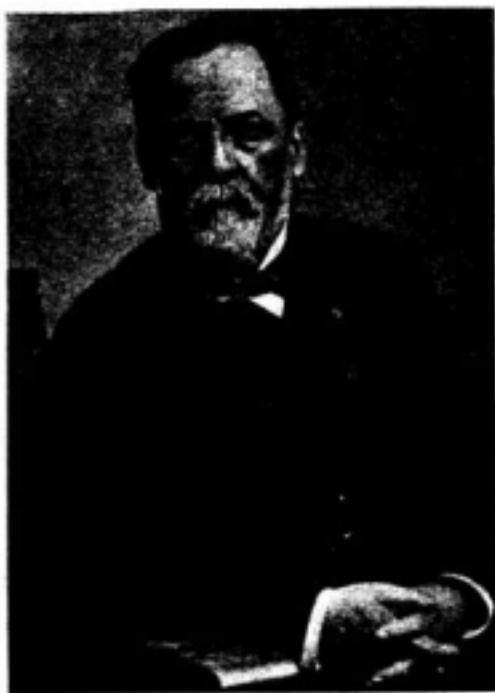
vamente leves, se introdujo la práctica de la **variolización**, consistente en inocularse con el material de las pústulas de los enfermos leves, con la esperanza de que se reprodujera una viruela también leve y que dejaría inmune al variolizado frente a epidemias graves de la misma enfermedad. Este procedimiento, aunque muy arriesgado, estuvo en práctica durante bastante tiempo.

Más tarde, en 1796, el médico **Eduardo Jenner** (1749-1823), observó que los vaqueros que accidentalmente se habían contagiado de una enfermedad pustulosa de las vacas llamada «vacuna» quedaban inmunes a la viruela. Se comenzó entonces la práctica de la **vacunación**, es decir, la inoculación intencionada de los hombres con el material procedente de las pústulas de las vacas, con el fin de inmunizar a aquéllos de la viruela.

Posteriormente, el término «vacunación» se ha extendido a toda inoculación con un material microbiano practicada con el fin de conferir inmunidad frente a determinada enfermedad al hombre o animal inoculados.



Eduardo Jenner, inventor de la vacunación



Luis Pasteur, fundador de la microbiología y autor de la primera vacuna con microorganismos atenuados.

Para prevenir el riesgo de provocar mediante la vacunación precisamente la enfermedad que se desea impedir, las vacunas se elaboran con microorganismos **muertos** o «atenuados», es decir, con su vitalidad disminuida de tal modo que son incapaces de producir la enfermedad. Los microorganismos muertos o atenuados conservan, sin embargo, sus **antígenos**, que son los que determinan en el organismo la aparición de **anticuerpos específicos** y de una **inmunidad también específica**. Este fue uno de los descubrimientos fundamentales del sabio francés **Luis Pasteur** (1822-1895).

Inmunidad activa e inmunidad pasiva

En todos los casos anteriores la inmunidad ha sido desarrollada en el organismo merced a su propia actividad biológica, estimulada por la introducción de los antígenos de que eran por-

tadores los microorganismos productores de la enfermedad o contenidos en las vacunas: se trata, pues, de una **inmunidad activa**.

En otros casos, se utilizan las propiedades inmunitarias del suero sanguíneo de un animal que se ha hecho activamente inmune para inmunizar a otro, sencillamente por el procedimiento de inyectarle a este último el suero inmune del primero.

Este es el caso del llamado **suero antidifláctérico**. Se trata del suero sanguíneo de un caballo al que se le ha inyectado **toxina difláctica** o una sustancia llamada **anatoxina**, que no es otra cosa que toxina desnaturalizada. El caballo, en respuesta a la inyección de toxina, elabora **antitoxina**, que pasa a su suero sanguíneo. Este suero, rico en antitoxina difláctica, se puede inyectar al hombre para protegerle contra la toxina del bacilo de la difteria, quedando así el hombre protegido contra esta enfermedad. Pero en este caso, la inmunidad la ha desarrollado activamente el caballo, y el hombre no se ha beneficiado de ella más que pasivamente. Por esta razón se trata de una **inmunidad pasiva**.

Aumento del nivel de vida y educación sanitaria

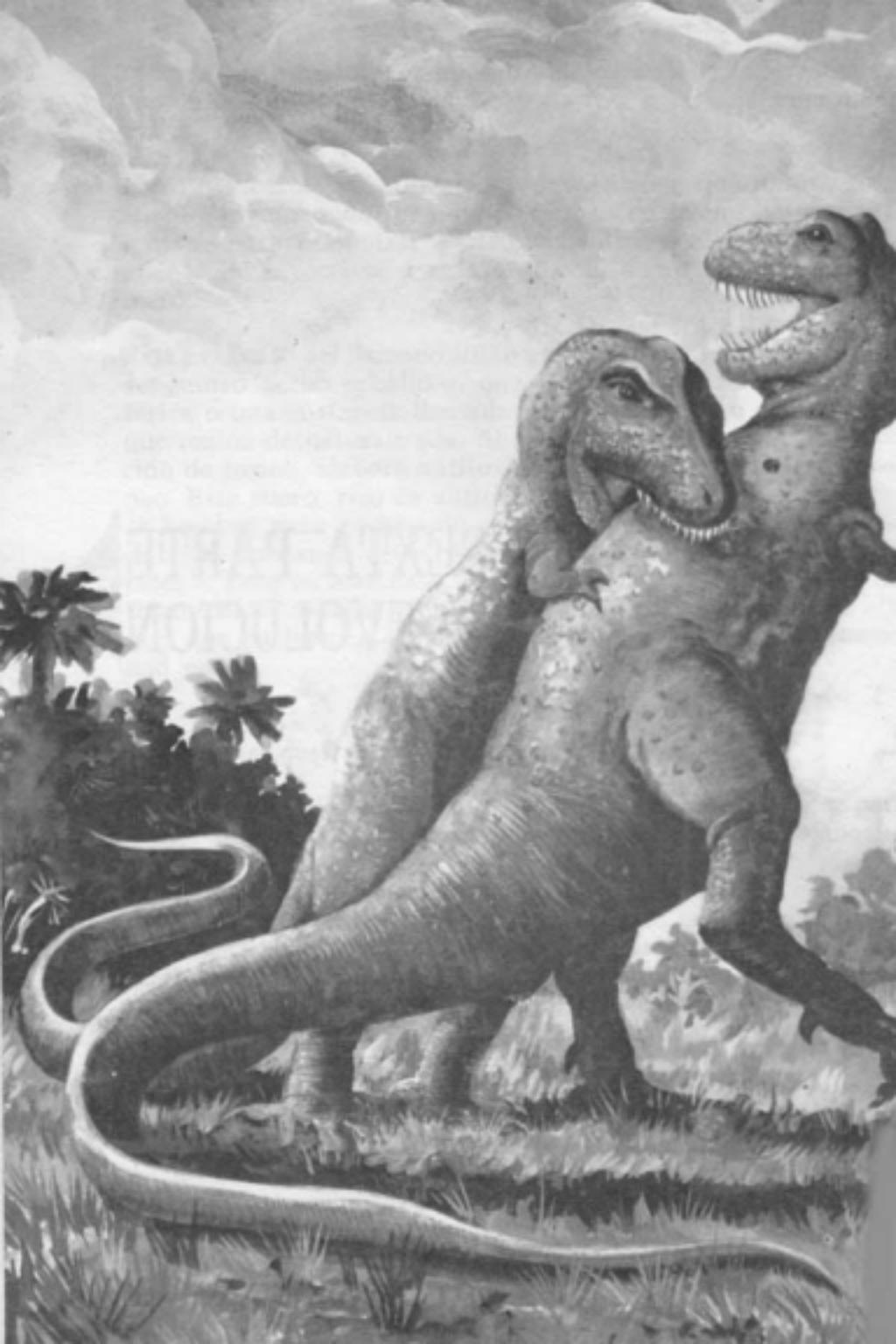
La **elevación del nivel de vida** es también una forma eficaz para luchar indirectamente contra las enfermedades microbianas.

La mejor nutrición hace aumentar las posibilidades de defensa del organismo; en las viviendas apropiadas, soleadas y sin humedad, el ambiente contiene menos microorganismos patógenos y en ellas, al vivir los hombres sin amontonarse, son menores las probabilidades de contagio; la depuración de las aguas de bebida y los alcantarillados evitan el riesgo de las enfermedades que se transmiten por el agua, etc.

Por otra parte, la **educación sanitaria** es también un importante factor. Con ella la población se acostumbra a los reconocimientos médicos periódicos, a las vacunaciones necesarias, a las medidas referentes a su higiene personal y a una alimentación racional.

SEXTA PARTE
LA EVOLUCION





LA EVOLUCION

El mundo actual se nos ofrece, desde un punto de vista biológico, como un conjunto de seres vivos cuya característica más sobresaliente es la diversidad, pues existen millones de especies muy diferentes entre sí por sus caracteres morfológicos, por las peculiaridades de sus maneras de vivir, etc.

Es más, si pudiéramos contemplar el panorama biológico que la tierra ofreció hace millones de años, nos quedariamos asombrados al contemplar unas formas de vida sumamente diferentes de las actuales.

Si pudiéramos, además, irnos desplazando a través del tiempo para observar la composición y distribución de la fauna y de la flora, nos dariamos cuenta de que en cada momento de la vida de la Tierra han convivido formas diferentes, de manera que la diversidad de dichas formas de vida no solamente se hace patente en el espacio, sino también en el tiempo.

Sin embargo, por lo que sabemos, al lado de esa gran diversidad, las formas de vida se caracterizan por una profunda unidad. Probablemente las células, los tejidos y los órganos han funcionado, en sus rasgos esenciales, siempre de manera semejante y la moderna biología nos está mostrando también que a nivel molecular los seres vivos ostentan unos trazos bioquímicos comunes.

Del hecho de la unidad biológica fundamental de los seres vivos se deduce que todos los seres vivos, lo mismo los que vivieron en épocas remotas que los que actualmente pueblan la Tierra, son todos ramas más o menos alejadas de un tronco común, que todos los seres vivos hemos tenido unos antecesores comunes. Esto hecho, que es hoy un lugar común del conocimiento de todos los biólogos, es conocido con el nombre de evolución.

◀ Unos animales extinguidos: los dinosaurios.

PROBLEMAS CIENTIFICOS DE LA EVOLUCION

Como queda dicho, todos los biólogos admiten actualmente que los seres vivos forman un conjunto continuo desde la aparición de la vida sobre nuestro planeta, es decir, que **unos descienden de otros** y que las formas de vida se han ido diferenciando paulatinamente hasta dar origen a la variedad de organismos que hoy pueblan la Tierra.

Aunque éste sea un conocimiento que se puede considerar como definitivamente adquirido, la evolución constituye todavía hoy un tema de interés científico **actual**, susceptible de investigación, ya que presenta muchos problemas que la ciencia tiene que resolver, faltando probablemente muchos hechos y datos que descubrir, y estando muchos otros sujetos a revisión y a diversas interpretaciones.

No son de la menor importancia las consecuencias filosóficas a que los hechos y las teorías de la evolución pueden dar lugar, aunque a este respecto hay que decir que, contra lo que en el pasado se ha mantenido muy profusamente, la mayoría de los autores cristianos no ven ya incompatibilidad entre el dogma católico y el hecho de la evolución, sino entre aquél y algunas interpretaciones de este mismo hecho.

Sin salir del terreno de la ciencia, hay que distinguir entre la **evolución como suceso biológico** y los **mecanismos de la evolución**.

LAS PRUEBAS DE LA EVOLUCION

Los biólogos han llegado al convencimiento de que las distintas especies descienden unas de otras, tras el descubrimiento y observación de una infinidad de datos que concuerdan de tal modo, que han sido considerados como **pruebas de la evolución**.

Todas las ciencias biológicas pueden aportar algunas pruebas de la evolución, pero fundamentalmente son la **anatomía comparada**, la **fisiología** y la **paleontología** las que nos muestran los documentos más fehacientes.

Pruebas anatómicas

A pesar de la gran variedad de los seres vivos, éstos se pueden agrupar por sus semejanzas anatómicas en una reducida serie de **modelos** a los que se ajustan todos los organismos, vegetales o animales.

Los organismos pertenecientes a cada uno de estos modelos forman un **Filum** o **Tronco**, guardando entre ellos semejanzas anatómicas muy marcadas, a pesar de que a veces tengan un aspecto externo muy diverso o un régimen de vida muy diferente.

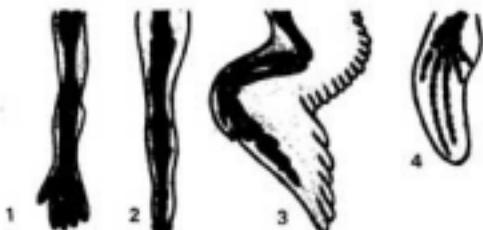
El Filum de los Vertebrados, perfectamente conocido desde el punto de vista anatómico, nos puede servir de ejemplo para fijar las ideas a este respecto.

Consideramos que todos los vertebrados son semejantes y están emparentados porque todos ellos tienen una **columna vertebral**, una **cabeza diferenciada**, un **sistema nervioso dorsal de procedencia ectodérmica** y algunos pocos rasgos comunes más.

Sin embargo, los peces son animales acuáticos, que respiran por branquias y tienen la piel cubierta de escamas, y las aves, por el contrario, respiran por pulmones y tienen el cuerpo cubierto de plumas; y a pesar de ello, los consideramos semejantes.

Esto sucede porque damos más importancia a la posesión de esa columna vertebral o a la situación y procedencia del sistema nervioso que a la manera de respirar o de proteger su piel, es decir, porque admitimos que existe una **Jerarquía de caracteres**, unos de mayor importancia que otros, considerando que son más importantes los caracteres que se encuentran afectados de una mayor generalidad.

La existencia de tales **caracteres principales**, que son propios de **todos** los organismos pertenecientes a un grupo, se considera una prueba de la **comunidad de origen** de todos ellos, es decir, de un **parentesco**. A su vez, existen **caracteres subordinados** que existen en parte de los organismos de ese mismo grupo, como la existencia de plumas en las aves, y entonces se supone que entre los componentes de este subgrupo hay un



Órganos homólogos. Las extremidades de los vertebrados.

1. Brazo de hombre.
2. Pata de caballo.
3. Ala de ave.
4. Aleta de ballena.

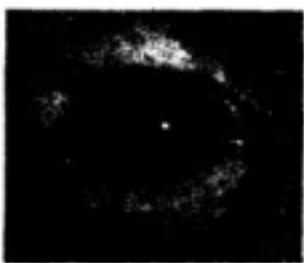
parentesco aún más estrecho. De un modo general se acepta, pues, que los organismos tienen un parentesco más íntimo mientras mayor número de caracteres comunes, principales o subordinados, tienen.

Muchos de los caracteres subordinados tienen una significación funcional que está en relación con el medio ambiente y el género de vida del organismo, y se dice que son **caracteres adaptativos**, o que el organismo está **adaptado** a tal o cual género de vida mediante la existencia de tales o cuales caracteres. Una consecuencia del fenómeno de la adaptación es que a veces resulta enmascarada la identidad anatómica del mismo órgano en dos organismos distintos, al haberse adaptado éstos a dos situaciones biológicas diferentes. Estos órganos que tienen el **mismo origen** y están adaptados al desempeño de **funciones distintas** se llaman **órganos homólogos**. El ejemplo más conocido es el de las extremidades de los vertebrados, que a partir de los anfibios tienen una estructura fundamental idéntica, pero que por crecimiento, reducción o atrofia de algunos de sus elementos pueden desempeñar el papel de mano en los primates, el de pata corredora en los équidos y rumiantes, el de ala en las aves, el de aleta en los cetáceos, etc.

Por el contrario, el fenómeno de la adaptación determina el que, en muchos organismos, **estructuras fundamentalmente distintas** se adapten al desempeño de la **misma función biológica**, como las alas de los insectos (meros repliegues del tegumento) y las alas de las aves (extremidades pentadáctilas), denominándose **órganos análogos**.



Órganos análogos. Ala de un ave y ala de un insecto.



Convergencia. Ojo de pulpo y ojo de mono.



Convergencia. Pata de alacrán cebollero y pata de topo.

La analogía puede llegar a extremos de semejanza entre los órganos análogos realmente extraordinarios, como es el caso del ojo de los vertebrados y el de los cefalópodos, que teniendo un origen enteramente diverso, anatómicamente muestran una semejanza absoluta. Este fenómeno se llama **convergencia**, y es muchas veces la causa de confusión entre órganos homólogos y análogos.

El estudio de las características anatómicas de los organismos y de sus transformaciones ha dado lugar al desarrollo de una ciencia, la **anatomía comparada**, que ha permitido trazar a grandes rasgos la **filogenia** de los distintos troncos animales y vegetales, entendiendo por filogenia la historia del desarrollo



Semejanzas entre los embriones de los vertebrados.

de dichos troncos y de sus relaciones entre ellos, en contraposición a la **ontogenia**, que es la historia del desarrollo de un solo ser vivo, desde el estadio de huevo al estadio de adulto.

La anatomía comparada se ha basado fundamentalmente tanto en el estudio anatómico de los seres **adultos** como de los **embriones**, habiéndose realizado gracias al estudio de éstos algunas valiosas aportaciones a los estudios sobre la evolución.

Ejemplo tradicional para ilustrar este tipo de aportaciones es la llamada **Ley biogenética de Haeckel**, enunciada por este biólogo alemán en el siglo pasado y que, aunque hoy se discute su validez para muchos casos, sigue teniendo un cierto valor general. Esta ley se enuncia diciendo que **la ontogenia es una recapitulación de la filogenia**, lo que quiere decir que los seres vivos, a lo largo de su desarrollo individual, sufren modificaciones anatómicas que recuerdan las formas de sus antecesores. Bastaría, pues, observar el desarrollo de un determinado

organismo para saber las líneas por las que había discurrido su historia filogenética. Así, por ejemplo, en los embriones de todos los vertebrados existe un esbozo de cola, que en algunos adultos no existe, y en cierta fase precoz del desarrollo embrionario de todos los vertebrados, el embrión ostenta unas hendiduras branquiales que serán únicamente funcionales en los peces y en las larvas de los anfibios, pero que no dejan rastro alguno en reptiles, aves o mamíferos adultos.

Pruebas fisiológicas

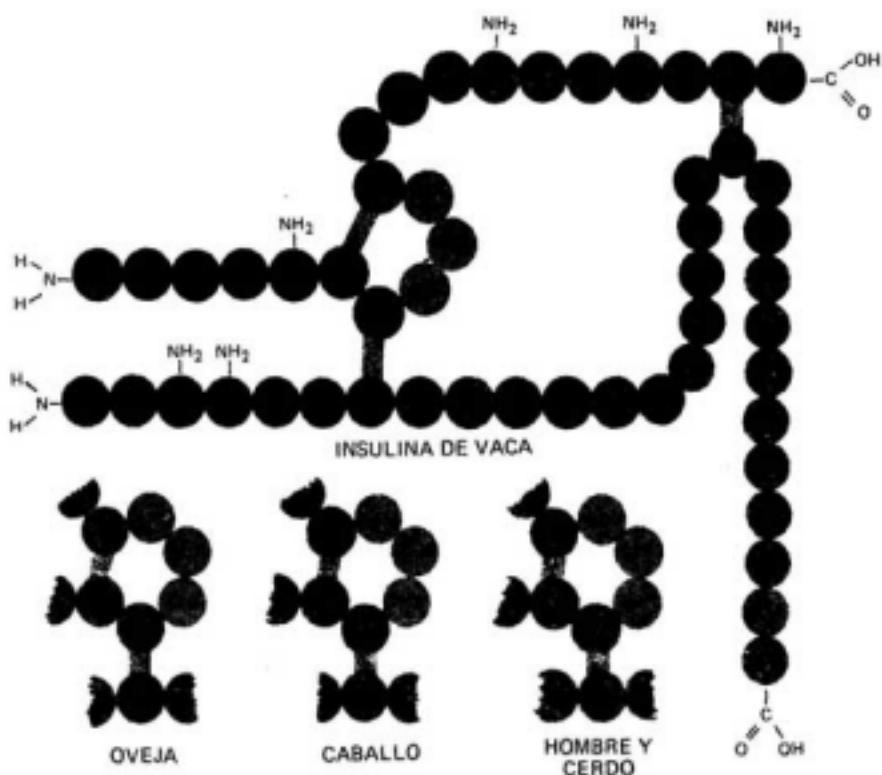
Toda estructura anatómica es, a su vez, funcional, de manera que todos los datos suministrados a los filogenetistas por la anatomía comparada son al mismo tiempo datos fisiológicos.

Sin embargo, existen determinadas semejanzas funcionales entre los seres vivos, que no se han podido poner de manifiesto más que por el empleo de métodos eminentemente fisiológicos.

Por ejemplo, para determinar el mayor o menor parentesco entre animales o entre plantas se emplea en la actualidad con gran éxito el **método inmunitario**. Se trata en este caso de utilizar las proteínas vegetales (de extractos de plantas) o animales (del suero sanguíneo, fundamentalmente) como antígenos que determinarán la formación del **anticuerpo** correspondiente en un animal de laboratorio. Se supone que si las proteínas antigénicas son **muy parecidas**, los animales y plantas de las que proceden están **emparentados** entre sí, estimándose la semejanza de las proteínas antigénicas (y en consecuencia el grado de parentesco) en función del número de **reacciones cruzadas** antígeno-anticuerpo que se produzcan.

Otro índice de parentesco entre especies es la mayor o menor **semejanza bioquímica** entre cadenas peptídicas sencillas, cuya secuencia de aminoácidos se conoce perfectamente en algunos casos. Así, por ejemplo, se han podido determinar semejanzas entre las cadenas de aminoácidos de las **insulinas** de varios mamíferos, que difieren solamente entre sí en tres aminoácidos.

Pero, realmente, una de las contribuciones más importantes a este respecto ha sido la demostración en estos últimos años



La molécula de insulina de los distintos mamíferos se diferencian unas de otras exclusivamente en tres aminoácidos.

de que las funciones más típicamente «vitales» tienen su asiento en **estructuras moleculares idénticas**, como el ADN y el ARN en la síntesis de las proteínas, el ATP para el trasiego de la energía, etc., datos que han conducido a los biólogos a formular la tesis de la unidad bioquímica de los seres vivos, que es hoy una de las más firmes pruebas de la evolución biológica.

Pruebas paleontológicas

Los paleontólogos han aportados a la teoría de la evolución una serie impresionante de documentos, que no solamente han servido de pruebas de la evolución, sino que nos ilustran decidida y directamente sobre los **caminos** que la evolución ha

A



Fósiles de animales extinguidos.

- A. Trilobites.
- B. Dinosaurio.

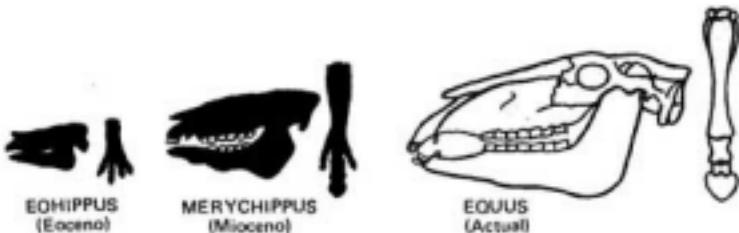
seguido en algunos grupos, lo que ha permitido incluso, generalizando estos casos, esbozar unas «leyes» de la evolución, que se supone que sigue todo grupo de organismos sometido al proceso evolutivo.

Efectivamente, los distintos estratos de las rocas sedimentarias, depositados sucesivamente a lo largo de los tiempos geológicos, contienen fósiles o restos de animales y vegetales cuyas características anatómicas están siempre en relación con la antigüedad de la roca en que yacen, habiéndose comprobado infinidad de veces que las formas de vida más primitivas se encuentran en los estratos más antiguos.

Podemos, pues, comprobar, a pesar de que no se ha conservado más que una mínima parte de los animales y plantas vivientes en cada período geológico, que ha habido un proceso sucesivo por el cual las diferentes faunas y floras se han ido sustituyendo sobre la Tierra, con la aparición de grupos nuevos enlazados con los ya existentes por medio de formas intermedias y con la extinción completa de grupos en otras épocas florecientes.



Los moluscos del género *Planorbis* de Wurtenberg; a medida que van siendo más modernos, la concha se va complicando sucesivamente.



Evolución de los équidos.

En algunos grupos, en que excepcionalmente se han conservado un número muy elevado de fósiles en estratos rigurosamente ordenados, se ha podido establecer con una gran seguridad la filogenia de un género o de una familia, como es el caso de los gasterópodos de agua dulce del género *Planorbis* en el Mioceno de Wurtenberg; en otros grupos se ha podido seguir la evolución a través de los tiempos geológicos y de los continentes, como sucede con los équidos antecesores del caballo actual, cuya evolución se realiza desde el pequeño *Eohippus* del Eocene, con cuatro dedos en cada pata, hasta el *Equus* actual, con un solo dedo, pasando por formas con tres dedos, como el *Merychippus* del Miocene; evolución que fue acompañada de cambios en el género de vida y grandes emigraciones, lo que determina que sus fósiles se encuentren esparcidos por el antiguo y el nuevo continente.

LEYES DE LA EVOLUCIÓN

Los paleontólogos, como queda dicho, han establecido unas **leyes de la evolución** que tienen un valor probado por la impresionante documentación recogida. Las más importantes de estas leyes, cuya significación puede discutirse, pero cuya realidad, en términos generales, no se puede negar, son las siguientes:

- a) **La ley de la diversidad progresiva de los seres vivos**, que afirma que a medida que va pasando el tiempo, los seres vivos se diversifican más y más, de manera que nuevas formas aparecen a partir de otras en abundante proliferación. Muchas de estas nuevas formas se extinguen, pero otras se conservan, sumándose a las ya existentes, por lo cual todos los esquemas filogenéticos tienen forma de árbol ramificado.
- b) **La ley de la irreversibilidad de la evolución**, que afirma que la evolución, como suceso histórico que es, no se vuelve jamás atrás. Cuando un órgano se pierde a lo largo del proceso evolutivo, no vuelve a aparecer, e incluso si aparece de nuevo un órgano que desempeña la misma función que el perdido, se trata de un órgano análogo y no homólogo. Así, por ejemplo, las aletas con esqueleto radiado de los peces se han perdido en los mamíferos, sustituidas por las extremidades pentadáctilas. Pues bien, en los mamíferos acuáticos como los delfines, las marsopas o las ballenas, las aletas pares, de idéntica función a las aletas de los peces, son miembros pentadáctilos modificados por una adaptación evolutiva, no aletas homólogas a las de los peces.
- c) **La ley de la especialización evolutiva**, que afirma que en el curso de la evolución se suele observar un proceso progresivo de especialización, que tiene como consecuencia una adaptación cada vez más estrecha a un determinado género de vida. En unos casos, esta especialización se ejerce sobre un órgano o un grupo de órganos, que colaboran al mejor desempeño de una determinada función, pero en general es el organismo entero el que se va especializando cada vez más, adaptándose a unas condiciones ambientales, de alimentación, de temperatura, etc., lo que se manifiesta por el aumento de tamaño, el cambio de forma e incluso por la regresión y desaparición de algunos órganos.

Así, por ejemplo, en los cetáceos, la progresiva especialización en el género de vida marino ha supuesto la conversión de las extremidades en aletas, la desaparición en las formas más adaptadas (ballenas) de las extremidades posteriores, la reducción y desaparición de la dentición y su sustitución por las «barbas», la creación de una poderosa capa de panículo



Balena, mamífero adaptado a la vida acuática.

adiposo subcutáneo, determinadas modificaciones en el aparato respiratorio pulmonar, etc.

A este respecto hay que hacer mención del hecho de que en muchas de las series filogenéticas se puede observar que ciertas características de los órganos se acentúan siempre en el mismo sentido, fenómeno que se ha denominado **ortogénesis**, que ha dado lugar a muchas interpretaciones y cuya significación es hoy muy discutida en relación con las distintas hipótesis que tratan de explicar las causas de la evolución.

MECANISMOS DE LA EVOLUCIÓN

Desde antiguo se han ideado muchas hipótesis para explicar el hecho evidente de la sustitución de las faunas y de las floras a través de los tiempos. Algunas de ellas tienen solamente un valor histórico, como la vieja teoría de Georges Cuvier (1769-1832) de las «creaciones sucesivas», que intentaba explicar dicha sustitución por sucesivas **catastrofes** que borraban la vida sobre la Tierra, seguidas de nuevos actos **creadores** con los que Dios volvía a poblar el planeta.

Aparte de esta ingenua teoría, las demás que se han ido sucediendo admiten todas ellas la descendencia de unas formas a partir de otras, es decir, el **transformismo**, en contraposición al **creacionismo**. Las dos doctrinas más importantes para explicar el transformismo son la de Juan Bautista de Lamarck (1744-1829) y la de Carlos Darwin (1809-1882).

El francés Lamarck, para explicar los fenómenos adaptativos en los organismos, enunció la teoría de la **herencia de los caracteres adquiridos**. Para Lamarck, los órganos sufren la influencia del ambiente y del género de vida, adaptándose a ellos de tal manera, que las sucesivas generaciones conservan los órganos que se usan y pierden los que no se utilizan. La frase: «La función crea el órgano» es la síntesis de la teoría de Lamarck, que él enunció en cuatro leyes, que podemos resumir como sigue:

- 1.* La vida, por sus propias fuerzas, tiende continuamente a aumentar el volumen de los seres vivos y las dimensiones de sus partes.
- 2.* La producción de un nuevo órgano en un animal resulta de una nueva necesidad y de una nueva tendencia que esta necesidad hace nacer.
- 3.* El desarrollo de los órganos está en razón de su uso.
- 4.* Todos los caracteres que se han adquirido en los individuos a lo largo de su vida son transmitidos a los descendientes.

El mérito de la teoría de Lamarck fue el haber sido el primero en darse cuenta de la importancia del medio ambiente y de la adaptación en los fenómenos evolutivos.

Como vemos, esta teoría lleva consigo dos importantes ingredientes. Primero, la acción de la necesidad ante un cambio ambiental o una nueva situación ecológica que mueve al individuo a la producción de nuevos órganos, al desarrollo de los órganos que se utilizan y a la atrofia de los que caen en desuso, y todo ello por un **estímulo interno** movido por esa necesidad, es decir, lo que podríamos llamar una acción inducida orientada del medio ambiente. Esta suposición tiene parcialmente apoyo en la existencia de las «series ortogenéticas» encontradas en ciertos organismos fósiles, y aunque la gran mayoría de los biólogos no están conformes con esta interpretación, algunos paleontólogos ven en dichas series un indicio de que en los organismos hay una tendencia progresiva interna hacia la complejidad.

En segundo lugar, la suposición de que los caracteres adquiridos durante la vida del organismo son **heredados** por sus

descendientes o, lo que es lo mismo, que la acción del ambiente influye de alguna manera en el material hereditario.

Esta segunda premisa ha sido objeto de numerosas experiencias a fin de comprobar su exactitud, habiéndose obtenido siempre resultados negativos. Además, como se verá, hoy se conocen mucho mejor los mecanismos de la herencia que en tiempos de Lamarck, y no hay ningún indicio que permita apoyar esta hipótesis. Por estas razones, el lamarckismo no es admitido en la actualidad más que por un número muy limitado de biólogos.

La otra teoría de conjunto sobre la evolución de las especies se debe al inglés Darwin, aunque hay que decir que muchas de sus ideas están contenidas en los escritos del español Félix de Azara (1746-1821) y, sobre todo, en los del inglés Alfredo Wallace (1823-1913).

Darwin, Azara y Wallace fueron naturalistas viajeros, que realizaron sus estudios al observar las variaciones de la fauna actual, a diferencia de Lamarck, cuya formación fue más la de un zoólogo de gabinete.

La experiencia de Darwin, adquirida sobre todo en un viaje de cinco años de duración que hizo alrededor del mundo en el barco Beagle (1831-1836), se concretó en el libro *The origin of species*, aparecido en 1859.

La idea fundamental de la teoría darwinista de la evolución es la de la **selección natural**. Darwin acopió durante su viaje multitud de datos referentes a muchas especies animales que presentaban una gran **variabilidad** individual y también observó que el número de descendientes de cada pareja de animales o de semillas en una planta es enormemente **superior** a número de los que llegan a ser animales o plantas adultos.

En consecuencia, no sobreviven **todos** los descendientes, sino algunos de ellos, y dado que dichos descendientes no son todos iguales, debido a la mencionada variabilidad, unos deben de tener más **probabilidades de sobrevivir** que otros. Esto serán los **mejor dotados** o, dicho de otra manera, los **mejor adaptados al ambiente**, los cuales transmitirán a su desce-

dencia las características que les han hecho triunfar sobre sus rivales, peor dotados para esta «lucha por la existencia». En suma, el ambiente natural habrá realizado una selección de los individuos supervivientes.

Al repetirse, generación tras generación, la variabilidad individual de los organismos y la supervivencia de los mejor adaptados de entre ellos, el conjunto de la población está cada vez más adaptado, acentuándose en sus individuos aquellas características que les han servido para adaptarse al ambiente, con el consiguiente cambio morfológico del conjunto de la población, que puede llegar a convertirse así en una especie muy distinta de la que componía el conjunto de sus antecesores.

La teoría de Darwin así formulada adolece de la imprecisión sobre las causas de las variaciones observadas por Darwin, y la mayor parte de los ataques que sufrió esta teoría lo fueron por no saberse entonces el mecanismo de producción de las pequeñas variaciones en el seno de una especie. Sin embargo, en el siglo actual, los genetistas han realizado importantes descubrimientos sobre estas variaciones, por lo que la inmensa mayoría de los biólogos aceptan en principio la teoría de Darwin, retocada por los datos aportados por los genetistas, en un cuerpo de doctrina denominado neodarwinismo.



GENETICA DE POBLACIONES Y EVOLUCION

Las ideas actuales sobre el problema de la evolución biológica tienen muy en cuenta algunos hechos sobre los que hay que tener unos conceptos muy precisos si no se quiere correr el riesgo de perderse en un laberinto de suposiciones poco fundadas.

En primer lugar, es necesario tener bien en cuenta que lo que evoluciona no son los individuos, sino las poblaciones animales o vegetales, y que no se debe concebir la evolución como un proceso lineal en el que el hijo está más adaptado al medio ambiente que su padre, sino como un fenómeno colectivo, por el cual en las sucesivas generaciones de una población, predominan cada vez más los individuos que han progresado más en el camino evolutivo.

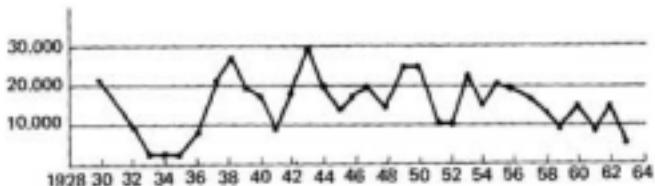
Por otra parte, es también preciso comprender que el proceso evolutivo se apoya inexorablemente sobre la variabilidad de la población que evoluciona, para lo cual es imprescindible un conocimiento lo más exacto posible de esa variabilidad y de sus fundamentos genéticos. Estos dos conceptos se funden en las adquisiciones de una moderna rama biológica, que hoy uno de los más firmes soportes de la tesis neodarwinista: la genética de poblaciones.

◀ La genética de las poblaciones animales nos da una importante información sobre los problemas de la evolución. Un banco de peces es una población natural.

POBLACIONES EN EQUILIBRIO

Cuando una población animal o vegetal se adapta a un determinado medio ambiente, el número de sus individuos va aumentando de generación en generación mientras lo permitan los factores ambientales, como la cantidad de alimento disponible, los depredadores sobre dicha población, los parásitos, etc. Todos estos factores limitantes de la población determinan al cabo de unas cuantas generaciones que el número de individuos que componen aquélla sea aproximadamente el mismo en cada generación. Se dice entonces que la población está en equilibrio o que se trata de una población estacionaria.

Este equilibrio dinámico se consigue difícilmente en las poblaciones naturales, y la mayoría de las veces se puede apreciar una fluctuación en los números de una misma población en generaciones sucesivas.



Fluctuación en una población. Número de stunes capturados entre 1930 y 1962 en la almadraba de Sancti-Petri, (Cádiz). (Según R. Roda)

Por ejemplo, supongamos que existe una población de aves rapaces que se alimenta principalmente de conejos. Un año de sequía, con la correspondiente falta de hierba, puede hacer disminuir el número de conejos. La población de rapaces, mal alimentada, se reproducirá menos y la generación del año siguiente será menos numerosa. Aunque persistan las condiciones meteorológicas, el segundo año la población de conejos, menos perseguida por las rapaces, se incrementará, haciendo posible al siguiente año una mayor población de aves. La gráfica que representa los números de ambas poblaciones será una línea ondulante, mientras que la que representara los números de una población en auténtico equilibrio con el medio sería una línea horizontal.

A pesar de tener solamente una existencia teórica, una población en equilibrio constituye un buen modelo para el estudio de algunas cuestiones sobre la genética de las poblaciones.

NUMERO DE INDIVIDUOS EN UNA POBLACION EN EQUILIBRIO

En una población en equilibrio, cuyos individuos se reproducen sexualmente y en la que todos sean fértiles, para que el número permanezca constante de generación en generación, llegarán a adultos, por término medio, **dos descendientes de cada pareja**.

Ahora bien, el número de descendientes posibles de una pareja es inmensamente grande, teniendo en cuenta la cantidad de gametos producido por los reproductores, por lo cual podemos afirmar que de una generación a otra se ha producido una **eliminación masiva** de posibles descendientes, eliminación que se verifica en varias etapas.

En primer lugar, la inmensa mayoría de los gametos que forman los reproductores de una población no se encuentran, y no dan lugar a huevos. En segundo, y sobre todo en los animales acuáticos, los huevos y larvas son devorados a millones por otros animales, escapando de esta mortandad tan solo una mínima parte. Por último, los adultos están también sujetos a la acción de los depredadores, de las enfermedades, de la escasez de alimentos, etc., y bastantes de ellos morirán antes de llegar a la época de la reproducción, en la que, como se ha dicho, no quedarán más que **dos adultos reproductores por cada pareja** que hubiera en la anterior generación.

FRECUENCIA DE LOS GENES EN UNA POBLACION

Toda población de organismos, considerada en su conjunto, posee la suma de los genes que están contenidos en los gametos de los individuos que la componen. Este conjunto de genes de una población es lo que se denomina **su acervo genético**.

Sin embargo, en las poblaciones hay siempre unos genes que se hallan en mayor abundancia que otros, y es posible calcular la abundancia relativa de cada gen en la población: esta

abundancia relativa se llama **frecuencia de un gen determinado**.

Si en una población tratamos de calcular la frecuencia de un gen determinado **A**, perteneciente a la pareja de alelos **Aa**, tendremos en cuenta que el acervo genético de dicha población está constituido, con respecto a esta pareja de genes alelos, por gametos **A** y gametos **a**. Cada individuo homozigótico dominante **AA** de la población será capaz de producir el doble número de gametos **A**, que los individuos heterozigóticos **Aa**, mientras que, naturalmente, los homozigóticos recesivos **aa** no producirán ningún gameto **A**.

Por consiguiente, la frecuencia del gen **A** dependerá de la distribución de los genotipos de los reproductores, y la frecuencia de un gen determinado se calculará por la suma del número de individuos homozigóticos con respecto a ese gen multiplicado por 2, más el número de individuos heterozigóticos, partida por el número de individuos de la población multiplicado por 2.

Por supuesto, se ve claramente que si en una población todos los individuos son homozigóticos con respecto a un gen, su frecuencia será 1, y también es fácil comprender que para saber la frecuencia de cada uno de los dos genes de una pareja de alelos, bastará con calcular la de uno de ellos, y restar la cifra obtenida de la unidad para saber la frecuencia del otro.

Supongamos, pues, una población de 1.000 individuos en la que queremos calcular la frecuencia de los genes de la pareja de alelos **Aa**, sabiendo que los genotipos se distribuyen en la población de la siguiente forma: 365 **AA**; 150 **Aa**; 485 **aa**.

Si llamamos **p** a la frecuencia del gen **A** y **q** a la del gen **a**, tendremos:

$$p = \frac{(365 \times 2) + 150}{1.000 \times 2} = 0,44$$

$$p + q = 1 ; \quad q = 1 - p ; \quad q = 1 - 0,44 = 0,56$$

ESTABILIDAD DE LA DISTRIBUCION GENETICA EN UNA POBLACION EN EQUILIBRIO

Además de una estabilidad numérica, las poblaciones ostentan una estabilidad genética que viene expresada por la ley de

Hardy-Weinberg. Esta ley, descubierta simultáneamente por dichos dos investigadores, se aplica a una población en equilibrio con el medio, en la que no se experimenten fenómenos de selección ni de mutación, que sea suficientemente numerosa, y en la que los cruzamientos entre los reproductores se realicen enteramente al azar.

Según dicha ley, en una población en estas condiciones, las frecuencias génicas y las proporciones entre los genotipos son absolutamente constantes, de generación en generación.

Efectivamente, consideremos una población en la que, de acuerdo con lo dicho anteriormente, en la generación g , los alelos A y a están en las frecuencias p y q , respectivamente.

Al producirse las uniones sexuales que han de proporcionar los individuos de la generación $g+1$, el acervo genético estará constituido por gametos masculinos y femeninos poseedores de los genes A y a, en las siguientes proporciones:

$$\begin{array}{ll} p \text{ gametos } \delta \text{ A} & p \text{ gametos } \varphi \text{ A} \\ q \text{ gametos } \delta \text{ a} & q \text{ gametos } \varphi \text{ a} \end{array}$$

Y como las uniones de los gametos masculinos y femeninos se hará enteramente al azar, las tres clases de zigotos AA, Aa y aa se formarán en las proporciones siguientes:

$$\begin{aligned} \text{zigotos AA: } & p \times p = p^2 \\ \text{zigotos aa: } & q \times q = q^2 \\ \text{zigotos Aa: } & (p \times q) + (q \times p) = 2pq \end{aligned}$$

quedando, pues, la generación $g+1$ formada por:

$$p^2 \text{ zigotos AA; } 2pq \text{ zigotos Aa; } q^2 \text{ zigotos aa.}$$

En esta generación, la frecuencia de los genes A y a será, pues:

$$\begin{aligned} \text{frecuencia de A} &= p^2 + pq = p(p+q) \\ \text{frecuencia de a} &= q^2 + pq = q(p+q) \end{aligned}$$

Y como, por definición, también en la generación $g+1$, la suma de las frecuencias $(p+q)=1$, resultará:

$$\begin{aligned} \text{frecuencia de A en la generación } g+1 &= p \\ \text{frecuencia de a en la generación } g+1 &= q \end{aligned}$$

es decir, las mismas frecuencias que en la generación g .

APLICACIONES DE LA LEY DE HARDY-WEINBERG

La ley de Hardy-Weinberg nos puede ser también de utilidad para averiguar las proporciones de los genotipos en una población en la que no conozcamos más que las proporciones en que están los fenotipos, y suponiendo que la población sea lo más parecido posible al modelo de una población estacionaria.

Supongamos, por ejemplo, que en una población existe un 91 por 100 de individuos fenotípicamente dominantes y un 9 por 100 de individuos fenotípicamente recesivos, en relación con un carácter determinado por los alelos **B** y **b**. Queremos saber cómo se distribuyen los genotipos **BB**, **Bb** y **bb** entre la población.

De acuerdo con la ley de Hardy-Weinberg, los citados genotipos estarán en las proporciones:

$$p^2 + 2pq + q^2$$

Ahora bien, nosotros sabemos que la frecuencia de la combinación **bb** es de 0,09, o lo que es lo mismo, que:

$$q^2 = 0,09 \quad ; \quad q = 0,30$$

Sabemos también que $p + q = 1$, luego $p = 1 - q$, y $p = 0,70$ y, por consiguiente, $pq = 0,21$

De cuyas cifras se deducen las frecuencias de las combinaciones **genotípicas** de la población, que son, respectivamente:

$$\begin{aligned} \text{genotipo } BB : p^2 &= 0,49 \\ \text{genotipo } Bb : 2pq &= 0,42 \\ \text{genotipo } bb : q^2 &= 0,09 \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} (\text{fenotipo dominante}) \\ (\text{fenotipo recesivo}) \end{array} \right\}$$

FACTORES DE LA EVOLUCIÓN

Una población en equilibrio es, como hemos visto, una población cuyo número de individuos se mantiene uniforme y cuyo patrimonio genético tampoco cambia de generación en generación.

Una población teórica de este tipo sería una población siempre igual a sí misma y en la que la evolución no sería posible.

Sin embargo, en las poblaciones naturales se producen constantemente unos fenómenos que rompen el equilibrio de la población con el medio ambiente, a consecuencia de lo cual la población cambiará paulatinamente su acervo genético por otro, es decir, será asiento de un **cambio evolutivo**.

Estos fenómenos son los llamados **factores de la evolución**, que se estudiarán a continuación.

LA MUTACION

Las **mutaciones**, de las que se ha hablado anteriormente, introducen nuevos genes en la población. Estos genes quedan así incorporados al acervo genético de la población y pueden ir extendiéndose por ésta, constituyendo un factor que aumenta la diversidad genética de la misma.

Como la frecuencia de las mutaciones a partir del alelo «normal» de una especie «salvaje» es siempre mayor que la frecuencia de las mutaciones por las cuales un gen mutado muta de nuevo hacia el alelo primitivo, existe constantemente en las poblaciones una **«presión de mutación»**, en virtud de la cual se aumenta el número de genotipos, los cuales constituirán la materia prima para que obren los otros factores de la evolución.

LA DERIVA GENETICA

La ley de Hardy-Weinberg no se cumple más que en las poblaciones muy grandes. Siendo, como hemos visto, el resultado de unos procesos estadísticos, y basada en la probabilidad de que las combinaciones genéticas de los descendientes se produzcan en razón de las iguales probabilidades de encontrarse todos los gametos masculinos con todos los gametos femeninos, si la población es lo suficientemente pequeña, los resultados de los cruces no serán los previstos, por la misma razón que si arrojamos al aire una moneda solamente diez veces, es poco probable que caigan cinco de cara y cinco de cruz, pero si la arrojamos al aire mil veces, las caras y las cruces nos darán cifras muy cercanas a 500 cada una.

Esta desigual distribución de los genes en las poblaciones pequeñas se llama **deriva genética**, y puede dar lugar a la variación del acervo genético por pérdida «casual» de un alelo, o por la alteración de las proporciones entre ellos.

Cuando la deriva genética se combina con la mutación, aquel fenómeno puede dar origen a una difusión anormalmente rápida del gen mutado en el seno de la población.

La deriva genética tiene singular importancia en las pequeñas poblaciones aisladas, como veremos.

MIGRACION GENICA

Otro factor que incrementa la variabilidad genética en una población es la **migración génica**, que consiste en la introducción de un nuevo gen en el acervo genético de la población, por el mestizaje de alguno de sus miembros con miembros de poblaciones vecinas. El gen introducido puede difundirse por la población por el mismo procedimiento que si se tratase de un gen mutado.

LA SELECCION NATURAL

El concepto de **adaptación** tiene un valor relativo, que está siempre condicionado por el **medio ambiente** que el individuo o la población habitan.

Así, por ejemplo, el color de un animal suele ser un carácter adaptativo, ya que si es más o menos semejante al del lugar donde habita, le hace menos visible y, por consiguiente, es menos probable que sea cazado por sus depredadores. Pero este mismo color no tendría valor adaptativo en un suelo de tonalidad distinta o en un ambiente en el que no hubiese depredadores.

Ahora bien, en una población existen ciertas combinaciones genotípicas que en un determinado ambiente, y gracias a que están mejor adaptados a él, proporcionan a sus poseedores una **mayor probabilidad de reproducirse**, o de producir un **mayor número de descendientes** que sus congéneres. Se dice entonces que estos genotipos tienen un mayor **valor adaptativo** que los demás.

En dicho ambiente, el acervo genético de las generaciones sucesivas irá cambiando en el sentido del **aumento de la frecuencia** de los genes (o de las combinaciones de genes) que constituyen dichos genotipos de mayor valor adaptativo, en detrimento de otros genes que irán siendo eliminados del acervo genético de la población.

Se dice entonces que el ambiente ha **seleccionado** a determinados genes o combinaciones de genes, ejerciendo una presión selectiva sobre la población a la que va «moldeando» generación tras generación, hasta conseguir una población muy adaptada y genéticamente muy uniforme que, en último extremo, llegase a estar en equilibrio con el ambiente y a cumplir la ley de Henry-Weinberg, equilibrio al que, desde luego, no se llega porque la aparición de nuevas mutaciones suele impedirlo.

Esta **selección natural** actúa por medio de varios mecanismos, concurrentes al mismo resultado, que son el ambiente físico (frío, calor, sequedad), los depredadores, los parásitos, los agentes patógenos, la concurrencia por el alimento o por el espacio, etc., los cuales representan los **factores** del medio ambiente.

El tipo de evolución impuesto a una población por la acción de las mutaciones y demás mecanismos de incremento de la variabilidad genética combinados con la selección natural, se denomina **evolución secuencial**, porque su resultado es una sucesión o secuencia de cambios adaptativos de los que es el sujeto una misma población. La evolución secuencial no es el origen de nuevas poblaciones, sino de cambios en la misma población.

EVOLUCION DIVERGENTE

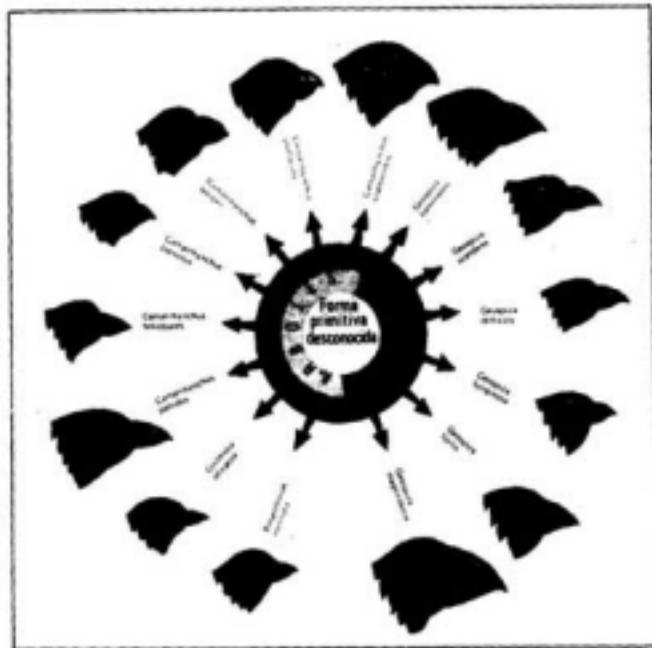
De ordinario, a los mecanismos de la evolución que hemos mencionado se unen unas circunstancias de **aislamiento** de parte de la población, que determinan el que esta parte de la población evolucione por su cuenta en un sentido distinto del resto, rompiéndose entonces la población primitiva en dos o más grupos de poblaciones que representarán razas o especies distintas. Este proceso se denomina **evolución divergente**, y

también especiación, porque es el mecanismo más extendido para la aparición de nuevas especies.

El aislamiento entre las partes de una población puede ser de varias clases.

Existe un aislamiento geográfico, determinado por la interposición de barreras más o menos eficaces para separar a dos grupos de individuos, como montañas, desiertos, el mar, etc.

Como es natural, este tipo de aislamiento geográfico exige en la mayoría de los casos una emigración previa de parte de la



Los pinzones de las islas Galápagos, según observó Darwin, han evolucionado divergentemente, dando especies distintas en las diferentes islas y adaptados a distinto género de alimentación.

población, y si esta población emigrante es de pequeño tamaño, es fácil comprender la acción decisiva de la deriva genética en la evolución divergente de este grupo separado.

Este es el caso de los pinzones de Darwin, dispersos por las islas Galápagos, de los que, aislados distintos fragmentos de la población original, evolucionaron divergentemente, formándose más de una docena de especies, en otras tantas islas,

adaptadas unas a la alimentación insectívora y otras a la alimentación granívora.

En otros casos, el factor de especiación más importante es el **aislamiento ecológico**, por el que, ocupando una misma área geográfica, los distintos grupos de individuos de la población primitiva se han adaptado a distintas **situaciones ecológicas**, que les separan tan eficazmente como las barreras geográficas. Es, por ejemplo, el caso de las especies de parásitos muy afines, pero que parasitan a distintos huéspedes.

Está, por último, el **aislamiento reproductor**, por el cual los individuos, aunque convivan, no se cruzan o lo hacen muy difícilmente. Esto puede ocurrir porque no coincidan las épocas de maduración de los gametos masculinos o femeninos, o porque haya diferencias en el comportamiento sexual que les impida el apareamiento.

Se ha observado, además, como factor de especiación, sobre todo en los vegetales, la existencia de un **aislamiento genético**, que consiste en la imposibilidad de realizarse con normalidad la cariogamia, debido a la diferencia entre los cromosomas de uno y otro reproductor, sobre todo en los casos de poliploidía.

MICROEVOLUCION Y MACROEVOLUCION

Las ideas generales que hoy reinan entre los biólogos con respecto a las vías y a los mecanismos de la evolución han sido elaboradas sobre las observaciones biológicas en poblaciones actuales vivientes y sobre los documentos que los paleontólogos han podido aportar en relación con la evolución de entidades tales como razas, variedades, especies o géneros. A la evolución a este nivel se le denomina **microevolución**, debido a la pequeña magnitud de los cambios evolutivos que separan una de otra especie o uno de otro género.

Existe además una **macroevolución**, que no se desarrolla ante nuestros ojos y de la que los paleontólogos conocen todavía muy poco.

La macroevolución es el conjunto de procesos evolutivos que han diferenciado entre sí los grandes troncos vegetales y ani-

males, la mayoría de los cuales se diferenciaron hace tanto tiempo de su común origen, que no se han conservado fósiles que nos ilustren sobre la forma de su aparición, a excepción de algunas pocas formas intermedias.

Por supuesto, aparentemente los cambios producidos por la macroevolución han sido mucho más importantes que los que se verifican por obra de los procesos microevolutivos, y esta es la razón por la que hay quien opina que en la macroevolución, además de los factores que intervienen en los pequeños cambios evolutivos, han obrado otros factores desconocidos, quizás **macromutaciones** de mayores consecuencias que las mutaciones observadas en el laboratorio y en la naturaleza viva hoy.

Sin embargo, está también muy extendida la opinión de que los mecanismos evolutivos han sido siempre los mismos, y que las diferencias entre la macroevolución y la microevolución, aparentemente cualitativas, son simplemente cuantitativas, resultando los grandes cambios macroevolutivos de la suma de las acciones de infinidad de mutaciones.

EL ORIGEN DE LA VIDA SOBRE LA TIERRA

Supuesta la descendencia de unas formas de vida de otras, un problema fundamental de la biología es el de averiguar cuándo y cómo apareció la vida sobre nuestro planeta.

El problema es muy difícil de resolver, pues de él ignoramos casi todos los datos que podrían acercarnos hacia su resolución.

Ignoramos, por ejemplo, cómo fueron las formas de vida más primitivas, ya que las que se han conservado en estado fósil son comparativamente ya muy evolucionadas y sumamente diferenciadas unas de otras, por lo que la paleontología no nos pueda aquí ayudar en nada.

Es posible que podamos identificar las formas más antiguas con algunas de las más sencillas de las actuales, pero esto no pasa de ser una verosímil hipótesis, ya que aunque muchos autores que opinan que los **virus** son las formas precelulares

de la vida y por consiguiente las más primitivas, otros científicos ven en ellos unas células bacterianas degradadas por el parasitismo o unas partículas autorreproducibles emancipadas de las células mismas, sin que existan actualmente argumentos irrebatibles para pronunciarse sobre su naturaleza.

Ignoramos también, aunque los geólogos y los astrónomos hayan aportado indicios muy valiosos para aventurar unas hipótesis muy plausibles, cuáles eran las condiciones de la Tierra en el remoto pasado, antes o durante la aparición de la vida.

Estas lagunas en nuestros conocimientos actuales, que fueron, naturalmente, más profundas tiempo atrás, llevaron a los científicos y a los filósofos a la elaboración de una serie de especulaciones sobre el origen de la vida sobre la Tierra, desprovistas en su mayor parte de una elemental base científica y de un mínimo fundamento experimental.

Durante el siglo XVIII y buena parte del XIX, estuvo muy extendida la teoría de la «generación espontánea», que admitía la formación de pequeños organismos a partir de diversas sustancias no organizadas. Esta teoría fue brillantemente derrocada por Pasteur, el cual demostró por medio de unos experimentos ingeniosamente concebidos y admirablemente ejecutados, que en la actualidad y en las condiciones que hoy se dan en nuestro planeta, no existe una tal generación espontánea.

Modernamente, con los progresos de la bioquímica y apoyada en los datos que aporta la geología, ha vuelto a resurgir la teoría de la generación espontánea, aunque concebida en otros términos y referida a los primeros tiempos de la Tierra.

Esta teoría se debe en gran parte a las ideas del ruso A. I. Oparin, que las expuso por primera vez de un modo extenso en 1936, aunque desde 1924 venía expresándolas de modo fragmentario.

La teoría de Oparin se denomina también teoría de la biogénesis o teoría del heterótrofo primitivo, porque significó un cambio de posición frente al problema teórico de la naturaleza del primer ser viviente; hasta Oparin se pensaba que el primer organismo tenía que haber sido un ser autótrofo,

puesto que éstos son los que en la actualidad nutren a los heterótrofos, los cuales naturalmente debían de ser de aparición posterior.

Oparin pensó que el primitivo ser vivo podía haber sido heterótrofo y alimentarse de un conjunto de materiales orgánicos existentes en el mar primitivo de nuestro planeta. Para esto se apoyó en algunos datos geológicos que nos hacen pensar que la envoltura gaseosa primitiva de la Tierra era una **atmósfera anoxigénica** (en contraste con la atmósfera oxigénica actual), es decir, una atmósfera **sin oxígeno libre**, de carácter reductor. Esta atmósfera primitiva debió contener, lo mismo que la hidrosfera primitiva, ciertas cantidades de hidrógeno (H_2), metano (CH_4), amoniaco (NH_3), vapor de agua (H_2O), acetileno (C_2H_2) y ácido cianhídrico (CNH), además de algunos otros grupos de elementos libres.

En esta atmósfera se realizarían unas **síntesis de moléculas orgánicas** más complicadas, a favor de tres fuentes de energía: la **radiación ultravioleta** del Sol, mucho más intensa que la de hoy, ya que no existía la capa de ozono atmosférico que obra como pantalla contra dicha radiación; la **radiación radioactiva** de los minerales de la Tierra y el calor engendrado por dicha radiación; la **energía eléctrica** de los rayos producidos en las tormentas. En consecuencia, el océano primitivo se fue convirtiendo en una disolución de moléculas orgánicas, a la cual los bioquímicos denominan la «**rica sopa**», en la cual abundaban aminoácidos, azúcares, bases púricas y pirimidínicas, etc.

Estas moléculas se organizarían, según Oparin, en unos **«coacervados»** o agregados de diversas moléculas orgánicas, rodeados de una capa molecular que les sirve de membrana y les aisla del medio, permitiendo sin embargo ciertos intercambios con él. Estos coacervados en los que habría ácidos nucleicos y proteínas enzimáticas, serían capaces de duplicar sus ácidos nucleicos y de mutar, quedando así abierta la puerta de una evolución más amplia.

Tanto Oparin como otros investigadores han realizado unos experimentos en vista a probar la posibilidad de la hipótesis, y efectivamente en atmósferas artificiales ricas en los citados

compuestos, y haciendo pasar corrientes eléctricas muy intensas, se ha logrado la síntesis de la mayoría de los presuntos constituyentes de la rica sopa, confirmando la verosimilitud y aun la probabilidad de que en la atmósfera y en el océano primitivos se realizasen estas síntesis.

La formación de los coacervados a expensas de estas moléculas orgánicas no parece tan fácil, pero tampoco puede descartarse en absoluto.

En conjunto, la hipótesis de Oparin es un intento plausible de resolver este importantísimo problema biológico, que ha tropezado y tropezará siempre con el grave obstáculo de la falta de datos contemporáneos de la aparición de los primeros seres vivos, aunque como sucede en otros aspectos de la Biología, los datos obtenidos en la actualidad pueden arrojar mucha luz sobre los procesos del pasado.

Lo que sí se puede afirmar concretamente es que después de la aparición de la vida sobre nuestro planeta, su conservación ha sido posible únicamente gracias a la presencia de la atmósfera. Esta fue, efectivamente, la causa de la singular circunstancia de que sobre la Tierra y durante los 2.000 ó 3.000 millones de años transcurridos desde aquel acontecimiento, se haya mantenido una temperatura prácticamente uniforme, con una máxima variación de la temperatura media anual de unos 20°C, ya que la atmósfera conservó a la Tierra como en el interior de un invernadero, regulando su temperatura por un mecanismo de evaporación del agua de los océanos por el cual cuando la Tierra se calentaba con exceso, se producía una mayor evaporación formándose una espesa capa de nubes que la protegía de una excesiva insolación; por el contrario, en las épocas en que la Tierra comenzaba a enfriarse, sobrevenía una condensación de las nubes, con grandes precipitaciones, disminución de la capa de nubes protectora de la insolación y el aumento consecutivo de ésta.

Por otra parte, la atmósfera ha permitido la aparición de ciertas formas de vida que sólo se hicieron posibles a medida de la evolución química de aquélla. Poco a poco, en efecto, y gracias sobre todo a la acción de las plantas verdes, la atmós-

fera se fue enriqueciendo en oxígeno, formándose además ozono por la acción de la energía eléctrica de las tormentas.

Estos dos hechos han sido decisivos para que la vida se haya desarrollado en nuestro planeta con las características que hoy ostenta, pues la capa de ozono, protectora de la radiación ultravioleta, y la relativa riqueza en oxígeno de la atmósfera fueron, en suma, las dos circunstancias que permitieron el desarrollo de los seres que viven fuera de las aguas.

APENDICE

SINOPSIS DE LOS SERES VIVOS

La variabilidad de la materia viva, con el concurso de la evolución, ha llevado a la existencia en el mundo de una serie muy numerosa de formas de vida, cuya clasificación ha ocupado desde hace siglos a los biólogos.

Hoy se conocen muchos modelos de organización, que se pueden ordenar, de menor a mayor complejidad, de la manera que se expresa en las líneas que siguen, en donde se exponen sumariamente las características de los grupos más importantes, con algunos ejemplos.

1. ORGANISMOS PROCARIONTES.—Seres cuyo material genético se halla dispuesto en un cromosoma sencillo, compuesto exclusivamente de ácido nucleico y no separado del resto de la célula por una membrana.

Virus.—Seres sencillos, compuestos exclusivamente en la mayor parte de los casos por una médula de ácido nucleico y una cápsula proteica (virus del mosaico del tabaco, de la gripe).

Micoplasmas.—Organismos unicelulares, de membrana delgada y no rígida, con un cromosoma de ADN y un citoplasma sencillo.

Bacterias.—Organismos unicelulares o filamentosos dotados de ordinario de una pared celular rígida, un cromosoma de ADN y un citoplasma sencillo. Sin clorofila o, en el caso de poseerla, localizada en unos gránulos llamados cromatóforos (colibacilo, bacilo de Kock, bacilo diftérico).

Clanoficeas.—Organismos unicelulares o filamentosos, con un cromosoma de ADN y un citoplasma sencillo. Tienen clorofila, localizada en unas láminas paralelas (*nostoc*).

2. ORGANISMOS EUCARIONTES.—Seres cuyo material genético está contenido en varios cromosomas formados de ADN y proteínas, encerrados en una membrana nuclear que los aísla del resto del citoplasma. Este último está dotado de retículo endoplasmático, dictiosomas, etc.

Protozoos.—Organismos unicelulares o en agrupaciones que no forman tejidos diferenciados y cuyas células alcanzan a veces una gran complejidad estructural.

Flagelados. Protozoos dotados de flagelos largos y, de ordinario, poco numerosos. Con clorofila o sin ella, pero si la poseen, localizada en cloroplastos (euglena, tripanosoma).

Rizópodos. Protozoos cuyos orgánulos de movimiento son los pseudópodos (ameba).

Esporozoos. Protozoos parásitos, en cuyo ciclo biológico se incluye un estadio de reproducción múltiple —esporulación— (plasmodio).

Ciliados. Protozoos dotados de cilios cortos y ordenados en filas llamadas cinetias (paramecio, vorticela).

Talofitas.—Vegetales unicelulares, filamentosos o macizos, cuyo cuerpo no está diferenciado en verdaderos órganos, por lo que se denomina talo.

Algas. Talofitas con clorofila y a veces con otros pigmentos. Acuáticas (espirogira, fuco).

Hongos. Talofitas sin clorofila, que se alimentan de sustancias orgánicas, como parásitos o saprofitas (moho, setas).

Líquenes. Talofitas mixtas, formadas por la unión simbiótica de un alga y un hongo.

Briofitas.—Vegetales pluricelulares, con un cuerpo formado por órganos, pero sin tejidos conductores. Generación alternante, con un esporofito poco desarrollado y dependiente del gametofito (musgos).

Pteridofitas.—Vegetales pluricelulares, con órganos y tejidos conductores. Generación alternante, con un esporofito muy desarrollado y un gametofito pequeño (helecho, licopodio).

Espermatofitas.—Vegetales con órganos y tejidos bien desarrollados, con flores como órganos reproductores.

Gimnospermas. Espermafitas con flores sin ovario cerrado (pino, abeto).

Angiospermas. Espermafitas con los óvulos encerrados en ovario (rosal, álamo).

Poríferos.—Animales inmóviles, coloniales, que se alimentan mediante corrientes de agua provocadas por unas células especiales, los coanocitos (esponjas).

Celentéreos.—Animales que tienen la pared del cuerpo formada por dos capas, ectodermo y endodermo. Generación alterna. Simetría radiada (madráporas, medusas).

Platelmintos.—Gusanos planos, alargados u ovales, de simetría bilateral. Ectodermo, endodermo y mesodermo bien desarrollados (tenias, duelas).

Nemátodos.—Gusanos cilíndricos, de simetría bilateral, la mayoría parásitos (lombrices intestinales, ascaris).

Rotíferos.—Animales pequeños, acuáticos, con un aparato rotatorio característico.

Briozoos.—Animales diminutos, coloniales, que semejan colonias de musgos. La mayoría marinos.

Braquiópodos.—Animales marinos, de simetría bilateral y una concha de dos valvas, una dorsal y otra ventral (terebratula).

Anélidos.—Animales segmentados, con cabeza bien desarrollada. Sistema nervioso ganglionar ventral, en forma de escalera de cuerda (lombriz de tierra).

Artrópodos.—Animales segmentados, con cabeza y apéndices pares bien desarrollados, cubiertos de un exoesqueleto de quitina, que se adelgaza en las articulaciones, de manera que sus anillos o artejos son móviles.

Trilobites. Artrópodos primitivos, extinguidos, con el cuerpo dividido en tres lóbulos longitudinales. Marinos.

Crustáceos. Artrópodos acuáticos, con antenas y con branquias (cangrejo).

Miriápodos. Artrópodos terrestres, con antenas y tráqueas. Muchos pares de patas (ciempiés).

Arácnidos. Artrópodos terrestres, con quelíceros, respiración por filotráqueas (arañas, escorpiones).

Insectos. Artrópodos terrestres, con antenas y tráqueas. Tres pares de patas. La mayoría, dos pares de alas (cucarachas, escarabajos, mariposas).

Moluscos.—Animales de cuerpo blando, no segmentados, con sistema nervioso ganglionar. Muchas veces cubiertos por una concha. Con una masa muscular, el pie, que sirve de órgano de locomoción.

Anfineuros. Moluscos marinos, con una concha formada de ocho placas.

Escafópodos. Moluscos marinos, con una concha tubular.

Lamelibranquios. Moluscos acuáticos, con una concha bivalva; branquias laminares (almeja, mejillón).

Gasterópodos. Moluscos acuáticos o terrestres, con una concha enrollada en espiral (caracol).

Cefalópodos. Moluscos marinos, con cabeza bien desarrollada y poderosos brazos musculosos a su alrededor (pulpo, sepia, calamar).

Equinodermos.—Animales de simetría radiada, con el cuerpo rodeado de un exoesqueleto calizo, provisto frecuentemente de espinas o píñulas (erizos de mar, estrellas de mar).

Cordados.—Animales de simetría bilateral, provistos de un eje longitudinal o notocorda. Sistema nervioso dorsal, de ordinario bien desarrollado.

Procordados. Cordados primitivos, a veces coloniales, sin columna vertebral. Marinos (salpas).

Vertebrados. Cordados superiores, con una columna vertebral que se diferencia anteriormente en un cráneo. Sistema nervioso muy desarrollado.

Ciclóstomos. Vertebrados sin mandíbulas, marinos, con branquias dispuestas en enrejado (lamprea).

Peces. Vertebrados acuáticos, con mandíbulas, respiración branquial. Piel cubierta de escamas. La mayoría ovíparos (tiburón, sardina).

Anfibios. Vertebrados que sufren una metamorfosis pasando de la forma larvaria con respiración branquial y acuática a la forma adulta con respiración pulmonar y terrestre. Ovíparos (rana, sapo).

Reptiles. Vertebrados terrestres o acuáticos con la piel cubierta de escamas, respiración pulmonar y ovíparos (serpientes, lagartos, tortugas).

Aves. Vertebrados con la piel cubierta de plumas. Homeotermos, de respiración pulmonar y ovíparos. Las extremidades anteriores convertidas en alas (águilas, mirlos, avestruces).

Mamíferos. Vertebrados con la piel cubierta de pelos. Homeotermos, de respiración pulmonar y vivíparos. Las hembras tienen glándulas mamarias para alimentar a las crías (caballo, conejo, ballena, hombre).

BIOLOGIA

II

d. f. galiano

