

Moléculas orgánicas

En este capítulo presentamos algunos de los tipos de moléculas orgánicas –que se pueden definir como moléculas que contienen carbono– que se encuentran en los seres vivos. Como podrá verse, la “puesta en escena” molecular es un grandioso espectáculo, con un reparto de miles de individuos; una sola célula bacteriana contiene alrededor de cinco mil clases diferentes de moléculas y una célula vegetal o animal tiene aproximadamente el doble. Estas miles de moléculas, sin embargo, están compuestas de relativamente pocos elementos (CHNOPS). De modo similar, relativamente pocos tipos de moléculas desempeñan los principales papeles en los sistemas vivos. Como notamos con anterioridad, el agua constituye entre el 50 y el 95% de un sistema vivo, y los iones pequeños tales como K^+ , Na^+ y Ca^{2+} dan cuenta de no más del 1%. Casi todo el resto, hablando en términos químicos, está compuesto de moléculas orgánicas.

En los organismos se encuentran cuatro tipos diferentes de moléculas orgánicas en gran cantidad. Estos cuatro tipos son los carbohidratos (compuestos de azúcares), lípidos (moléculas no polares, muchas de las cuales contienen ácidos grasos), proteínas (compuestas de aminoácidos) y nucleótidos (moléculas complejas que desempeñan papeles centrales en los intercambios energéticos y que también pueden combinarse para formar moléculas muy grandes, conocidas como ácidos nucleicos). Todas estas moléculas: carbohidratos, lípidos, proteínas y nucleótidos contienen carbono, hidrógeno y oxígeno. Además, las proteínas contienen nitrógeno y azufre, y los nucleótidos, así como algunos lípidos, contienen nitrógeno y fósforo.

Se ha dicho que sólo se necesita ser capaz de reconocer aproximadamente 30 moléculas para tener el conocimiento suficiente que permita trabajar con la bioquímica de las células. Dos de esas moléculas son los azúcares glucosa y ribosa; otra, un lípido; otras veinte, los aminoácidos biológicamente importantes; y cinco las bases nitrogenadas, moléculas que contienen nitrógeno y son constituyentes clave de los nucleótidos. Si usted es paciente, rápidamente será capaz de reconocer a los intérpretes y sus papeles y de distinguir las estrellas de los miembros del coro. Si lo desea, considere esto como una introducción a los personajes principales; el argumento comienza a desarrollarse en el capítulo 4.

EL PAPEL CENTRAL DEL CARBONO

El esqueleto de carbono

Como se recordará del capítulo 1, un átomo de carbono tiene seis protones y seis electrones, dos electrones en su primer nivel de energía y cuatro en el segundo. Así, el carbono puede formar cuatro enlaces covalentes con cuatro átomos diferentes como máximo. El metano (CH_4), que es un gas natural, es un ejemplo (véase fig. 1-10). Aun más importante, en términos del papel biológico del car-

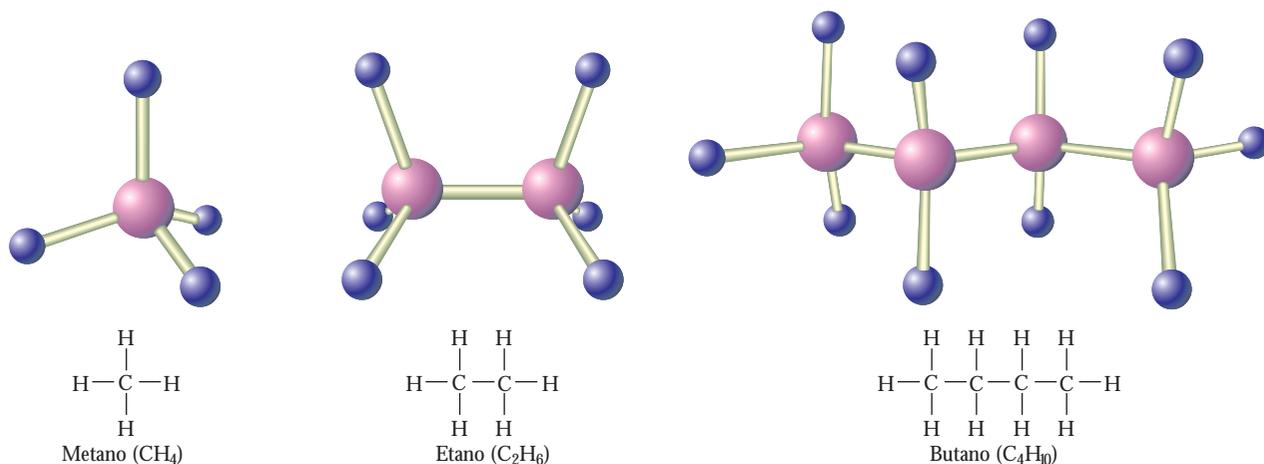


Fig. 3-1. Modelos de esferas y varillas y fórmulas estructurales del metano, etano y butano. En los modelos, las esferas de color morado representan a los átomos de carbono y las esferas azules, más pequeñas, representan a los átomos de hidrógeno. Las varillas de los modelos –y las líneas en las fórmulas estructurales– representan enlaces covalentes, cada uno de los cuales está formado por un par de electrones. Nótese que cada átomo de carbono forma cuatro enlaces covalentes.

bono, sus átomos pueden formar enlaces entre sí. El etano, por ejemplo, contiene dos carbonos; el propano, tres; el butano, cuatro; y así sucesivamente, formando cadenas largas (fig. 3-1). En general, una molécula orgánica deriva su configuración final de la disposición de sus átomos de carbono, que constituyen el esqueleto o columna de la molécula. La configuración de la molécula, a su vez, determina muchas de sus propiedades y su función dentro de los sistemas vivos (véase el ensayo: *¿Por qué no el silicio?*)

En las moléculas que se muestran en la figura 3-1, cada enlace de carbono que no está ocupado por otro átomo de carbono es ocupado por un átomo de hidrógeno. Los compuestos formados sólo por carbono e hidrógeno se conocen como **hidrocarburos**. Estructuralmente, son el tipo más simple de moléculas orgánicas. Aunque la mayor parte de los hidrocarburos derivan de los restos de organismos que murieron hace millones de años, son relativamente de poca importancia en los organismos vivos (fig. 3-2). Sin embargo, son de gran importancia económica; los combustibles líquidos de los cuales dependemos, gasolina, diesel y petróleo para calefacción, están todos compuestos de hidrocarburos.

Grupos funcionales

Las propiedades químicas específicas de una molécula orgánica derivan principalmente de los grupos de átomos conocidos como *grupos funcionales*. Estos grupos están unidos al esqueleto de carbono, reemplazando a uno o más de los hidrógenos que estarían presentes en un hidrocarburo. Un grupo –OH (hidroxilo) es un ejemplo de un grupo funcional.* Cuando un hidrógeno y un oxígeno se unen covalentemente, un electrón exterior del oxígeno sobra, queda no apareado, no compartido; puede entonces ser compartido con un electrón exterior que, de modo semejante, quedó disponible en un átomo de carbono, formando así un enlace covalente con el carbono. Un compuesto con un grupo hidroxilo que reemplaza a uno o más de los hidrógenos de un hidrocarburo, se conoce como alcohol. Así, el metano (CH₄) en el que un átomo de hidrógeno es reemplazado por un grupo hidroxilo, se transforma en metanol o alcohol de madera (CH₃OH), que es un compuesto de olor agradable, tóxico, notable por su capacidad para causar ceguera y muerte. De modo semejante, el etano se transforma en etanol o alcohol de grano (C₂H₅OH), que está presente en todas las bebidas al-

*–OH, el grupo funcional se llama hidroxilo; OH⁻, el ion se llama hidróxido.

¿Por qué no el silicio?

El silicio (número atómico 14) es más abundante que el carbono (número atómico 6). Como nos indica su número atómico, el silicio también requiere cuatro electrones para completar su nivel de energía exterior. ¿Por qué entonces se lo encuentra tan raramente en la mayoría de los sistemas vivos? Porque los átomos de silicio son más grandes que los átomos de carbono; la distancia entre dos átomos de silicio es mucho mayor que la distancia entre dos átomos de carbono. Como resultado, los enlaces entre los átomos de carbono, que se mantienen más juntos, son casi dos veces más fuertes que los enlaces entre los átomos de silicio. Así, el carbono puede formar cadenas largas y estables y el silicio no.

La capacidad del carbono para formar enlaces dobles también es crucial para su papel central en la biología. Como vimos en el capítulo 1, un átomo de carbono puede combinarse con dos átomos de oxígeno por medio de dos enlaces dobles; la molécula de dióxido de carbono, con todos sus requerimientos electrónicos satisfechos, flota en el aire como gas, libre e independiente. También se disuelve rápidamente en el agua y, por lo tanto, está disponible para los sistemas vivos. En el dióxido de silicio, por oposición, el átomo de silicio forma enlaces simples con los dos átomos de oxígeno, dejando dos electrones sin aparear en el silicio y uno en cada oxígeno. En consecuencia, el átomo de silicio necesita ganar dos electrones para llenar su nivel de energía exterior y cada átomo de oxígeno necesita ganar un elec-



Este delicado esqueleto de un microorganismo de la Bahía de Narragansett, en Rhode Island, está compuesto por dióxido de silicio. El material dentro del esqueleto es desecho orgánico.

trón. Así, los electrones no apareados son rápidamente compartidos con electrones no apareados de moléculas vecinas de SiO_2 , formando, finalmente, granos de arena, rocas o, con intervención biológica, las conchillas de los organismos microscópicos marinos.

cohólicas. El glicerol, $\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3$, contiene, según indica su fórmula, tres átomos de carbono, cinco átomos de hidrógeno y tres grupos hidroxilo.

El cuadro 3-1 ilustra los grupos funcionales que serán de mayor interés para nosotros en nuestra exploración de los sistemas vivos. Un conocimiento de los grupos funcionales facilita reconocer moléculas particulares y predecir sus propiedades. Por ejemplo, el grupo carboxilo ($-\text{COOH}$), mencionado en el capítulo anterior, es un grupo funcional que da a una molécula las propiedades de ácido. Los alcoholes, con sus grupos hidroxilos polares, tienden, por ejemplo, a ser solubles en agua, mientras que los hidrocarburos como el butano, que tienen solamente grupos funcionales no polares (como los grupos metilo), son altamente insolubles en agua. Los grupos aldehído a menudo están asociados con olores y sabores acres. Las moléculas más pequeñas con grupos aldehído, como el formaldehído, tienen olores desagradables mientras que las más grandes, como aquellas que dan a las vainillas, las manzanas, las cerezas y las almendras sus aromas característicos, tienden a ser agradables para el aparato sensorial humano.

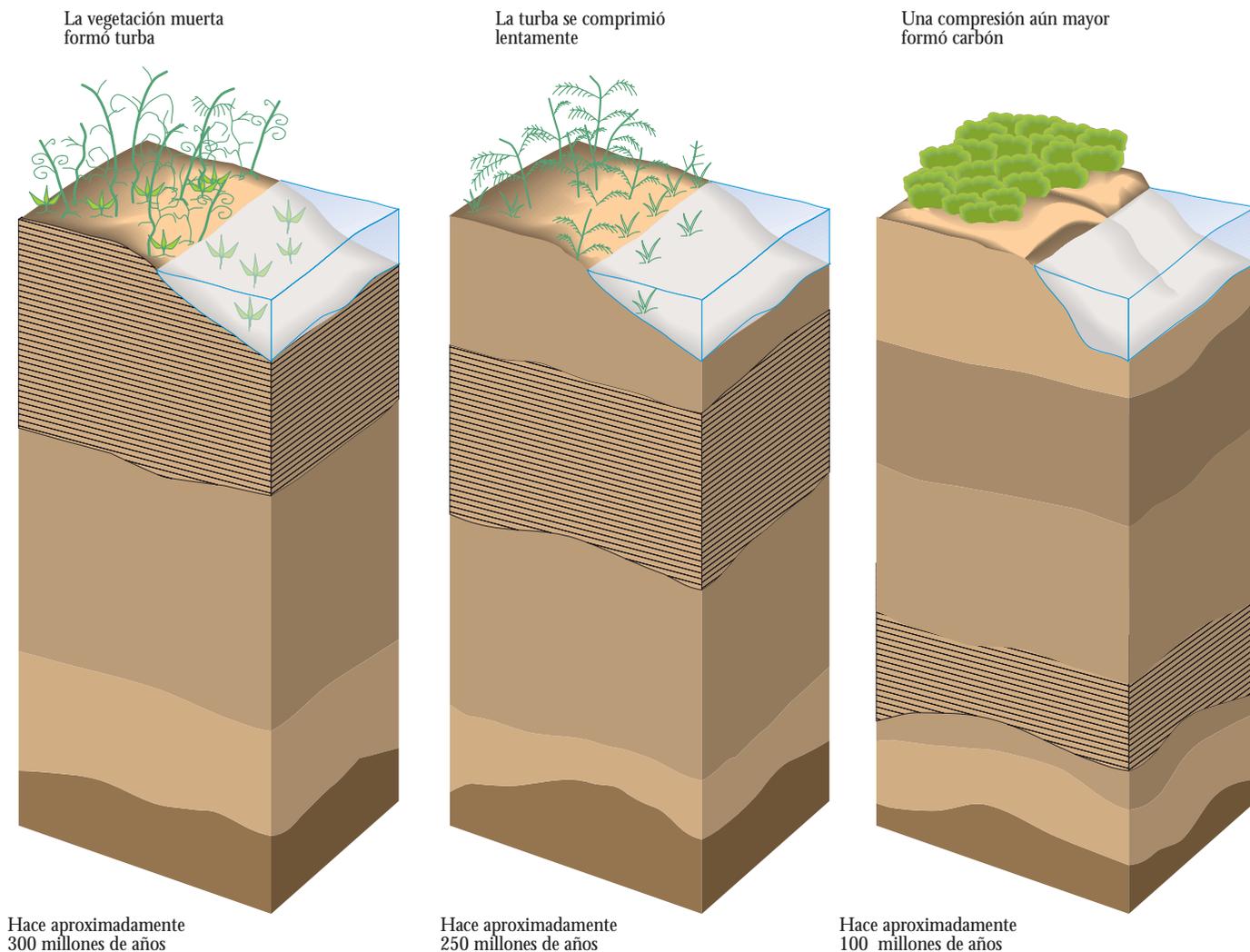


Fig. 3-2. En el proceso de fotosíntesis, el carbono del dióxido de carbono atmosférico es incorporado a las moléculas orgánicas por acción de las plantas. Estas moléculas suministran la energía que pone en movimiento a los sistemas vivos y que también se utiliza para construir las moléculas estructurales de mayor tamaño que componen a los organismos vivos. Hace aproximadamente trescientos millones de años, las condiciones en la Tierra eran adecuadas para el crecimiento de bosques y selvas en terrenos pantanosos. Los restos de esas plantas se acumulaban en el fondo de los pantanos y, por acción de bacterias, se transformaban en turba. Por procesos de compactación, cambios químicos y aumento de temperatura, la turba se transformó en carbón. También se formó petróleo por procesos de transformación de organismos marinos y terrestres.

Como se puede ver, la mayoría de los grupos funcionales del cuadro 3-1 son polares y, por lo tanto, tienen regiones con carga positiva y negativa en solución acuosa. Así, confieren solubilidad en agua y carga eléctrica local a las moléculas que los contienen.

Algunos de los grupos funcionales polares tienden a ionizarse completamente, según el pH de la solución. Muchos grupos funcionales participan directamente de las reacciones químicas de mayor interés en los sistemas biológicos.

Isómeros y actividad biológica

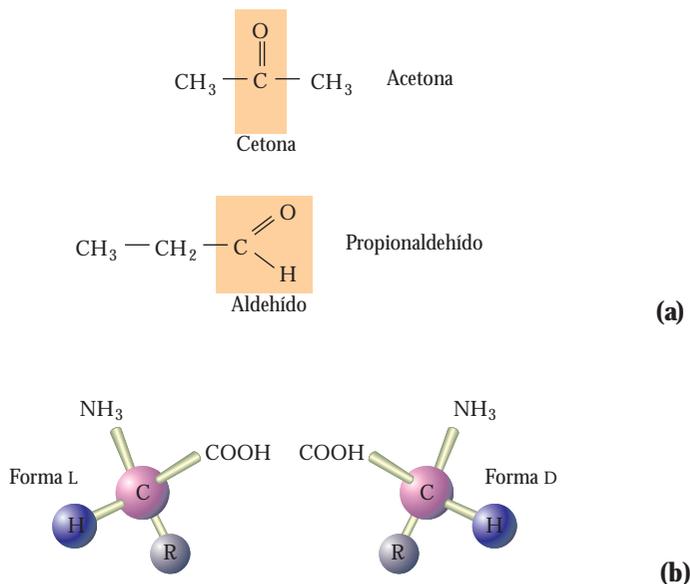
Ciertos compuestos tienen la misma fórmula química pero sus átomos se disponen de manera diferente. Estos compuestos se denominan **isómeros**. Existen distintos tipos de isómeros, entre ellos, los isómeros estructurales y los isómeros ópticos. Los **isómeros estructurales** son compuestos que tienen la misma fórmula molecular pero difieren en cómo se unen los átomos entre sí. Por ejemplo, la acetona tiene la misma fórmula general que el propionaldehído (C_3H_6O). La diferencia entre ambos compuestos es que, en el primer caso, el grupo funcional que caracteriza a la molécula es una cetona, y en el segundo, un aldehído (fig. 3-3 a). Si bien tienen el mismo tipo y cantidad de átomos, los isómeros estructurales difieren en sus propiedades químicas.

Cuadro 3-1. Algunos grupos funcionales biológicamente importantes

Grupo	Nombre	Importancia biológica
-OH	Hidroxilo	Polar y, por esta razón, soluble en agua; forma puentes de hidrógeno
$\begin{array}{l} \text{O} \\ \parallel \\ \text{-C} \\ \backslash \\ \text{OH} \end{array}$	Carboxilo	Ácido débil (dador de hidrógeno); cuando pierde un ion hidrógeno adquiere carga negativa: $\begin{array}{l} \text{O} \\ \parallel \\ \text{-C} \\ \backslash \\ \text{O}^- + \text{H}^+ \end{array}$
$\begin{array}{l} \text{H} \\ \\ \text{-N} \\ \\ \text{H} \end{array}$	Amino	Base débil (aceptor de hidrógeno); cuando acepta un ion hidrógeno adquiere carga positiva: $\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{-N}^+ - \text{H} \\ \\ \text{H} \end{array}$
$\begin{array}{l} \text{H} \\ \\ \text{-C} = \text{O} \end{array}$	Aldehído	Polar y, por esta razón, soluble en agua; caracteriza a algunos azúcares
$\begin{array}{l} \backslash \\ \text{C} = \text{O} \end{array}$	Cetona (o carbonilo)	Polar y, por esta razón, soluble en agua; caracteriza a otros azúcares
$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{-C} - \text{H} \\ \\ \text{H} \end{array}$	Metilo	Hidrofóbico (insoluble en agua)
$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{-P} - \text{OH} \\ \\ \text{OH} \end{array}$	Fosfato	Ácido (dador de hidrógeno); en solución presenta habitualmente carga negativa $\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{-P} - \text{O}^- + 2\text{H}^+ \\ \\ \text{O}^- \end{array}$

Los **isómeros ópticos** o **enantiómeros** son moléculas idénticas excepto en su geometría tridimensional. Cuando cuatro átomos o grupos funcionales diferentes están unidos a un único átomo de carbono, hay dos disposiciones posibles de los átomos en el espacio, y ese carbono es asimétrico. Como consecuencia, una de las disposiciones es la imagen especular de la otra. De la misma manera que el pie izquierdo es la imagen especular del derecho, un isómero óptico es la imagen especular del otro. Ni en el caso de los isómeros ni en el de los pies, es posible superponer ambas estructuras; esto se denomina *quiralidad*. Una consecuencia de la quiralidad es que las moléculas biológicas, por ejemplo, las enzimas, sólo pueden actuar con un isómero en particular ya que estructuralmente no pueden “encajar” con el otro isómero. De la misma manera, no es posible calzar el pie derecho en el zapato correspondiente al izquierdo. Un claro ejemplo de este fenómeno es el de los aminoácidos. Todos los aminoácidos se pre-

Fig. 3-3. Dos tipos de isómeros. *a)* Isómeros estructurales: moléculas que presentan la misma cantidad y tipo de átomos, pero dispuestos de manera diferente. *b)* Los isómeros ópticos son uno la imagen especular del otro y no se pueden superponer.



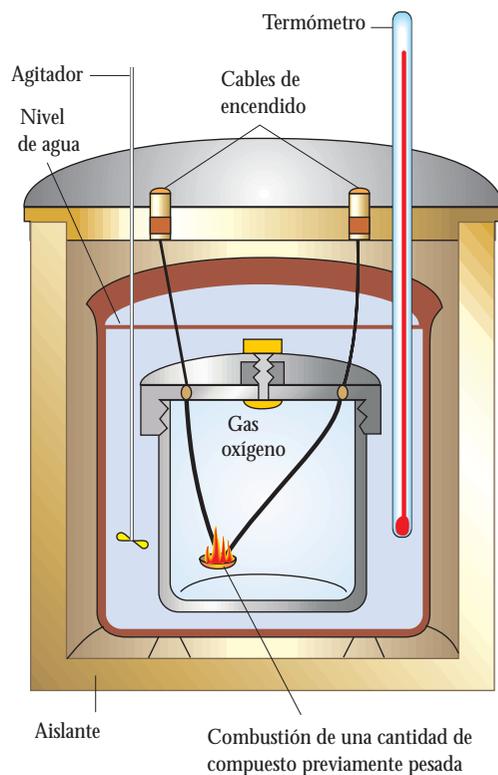
sentan en dos formas, los dos isómeros ópticos, llamados forma L y forma D (fig. 3-3 b). Sólo los aminoácidos L se encuentran comúnmente en las proteínas de los seres vivos.

El fenómeno de la simetría ha intrigado a los científicos desde hace mucho tiempo. A mediados del siglo XIX, Louis Pasteur analizaba el fenómeno de la simetría en relación con los seres vivos. Al examinar con el microscopio cristales de sustancias denominadas tartratos, encontró que podía separar los cristales en dos grupos, basándose en su diferente aspecto externo. Al disolver en agua estos dos cristales por separado y analizarlos con un polarímetro rudimentario, encontró que cada una de las dos soluciones tenía un efecto diferente sobre la luz polarizada. En general, cuando se hace pasar luz polarizada por una solución que contiene un isómero óptico, el plano de polarización de la luz gira a la derecha o a la izquierda, según cuál de los dos isómeros se encuentre disuelto. El polarímetro permite medir la dirección y la magnitud de la rotación. Pasteur analizó el comportamiento de algunos organismos frente a sustancias orgánicas isoméricas. Así, pudo concluir que las sustancias orgánicas producidas por los seres vivos pueden rotar el plano de la luz polarizada en una determinada dirección. En años posteriores, estas conclusiones fueron importantes para investigar el problema del origen de la vida.

El factor energético

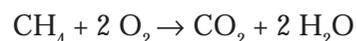
Los enlaces covalentes –que se encuentran comúnmente en las moléculas orgánicas– son enlaces fuertes y estables, constituidos por electrones que se mueven en orbitales alrededor de dos o más núcleos atómicos. Estos enlaces tienen diferentes fuerzas características, que dependen de las configuraciones de los orbitales. Recordemos del último capítulo que las moléculas están siempre en movimiento, vibrando, rotando y cambiando de posición con respecto a otras moléculas. Los átomos dentro de las moléculas también están en movimiento, vibrando y a menudo rotando alrededor de los ejes de sus enlaces. Si este movimiento se hace bastante grande (o sea, si los átomos poseen suficiente energía cinética), el enlace se “romperá” y los átomos se separarán unos de otros. Las fuerzas de enlace se expresan convencionalmente en kilocalorías por mol, en función de la energía que debe suministrarse para romper el enlace en condiciones estándar de temperatura y presión.

Fig. 3-4. Se usa un calorímetro para medir la cantidad de energía almacenada en un compuesto orgánico. Una cantidad conocida del compuesto se incinera eléctricamente. Cuando este compuesto se quema, se mide el aumento de temperatura del agua circundante. Usando el calor específico del agua y el peso conocido del agua del calorímetro se puede calcular el número de calorías liberadas por la incineración de la muestra.



Cuando se rompe un enlace covalente, se liberan los átomos que conforman las moléculas (o en algunos casos los grupos de átomos). Cada átomo habitualmente lleva consigo sus propios electrones, lo que da como resultado átomos cuyos niveles de energía exteriores están sólo parcialmente llenos con electrones. Por ejemplo, cuando los átomos de una molécula de metano están vibrando y rotando tan rápidamente que se rompen los cuatro enlaces carbono-hidrógeno, quedan un átomo de carbono y cuatro átomos de hidrógeno libres, y cada uno de estos átomos necesita ganar electrones para completar su nivel de energía exterior. Así, los átomos tienden a formar nuevos enlaces covalentes muy rápidamente, restableciendo la condición estable caracterizada por estar completos los niveles de energía exteriores. Los nuevos enlaces que se forman pueden ser idénticos a los que se habían roto o diferentes, y esto depende de varios factores: la temperatura, la presión y, lo más importante, de cuáles otros átomos están disponibles en la vecindad inmediata.

Las reacciones químicas en las cuales se forman combinaciones nuevas siempre implican un cambio en las configuraciones de los electrones y, por lo tanto, en las fuerzas de enlace. Dependiendo de las fuerzas relativas de los enlaces rotos y de los formados en el curso de una reacción química, el sistema o bien liberará energía o la obtendrá del medio circundante. Considérese, por ejemplo, la combustión del metano, representada por la siguiente ecuación:



Esta reacción, que puede ser desencadenada por una chispa, es frecuentemente la causa de explosiones en las minas de carbón. Cuando ocurre, libera energía en forma de calor. La cantidad de energía liberada puede medirse con bastante precisión, según se muestra en la figura 3-4. Resulta ser de 213 kilocalorías por mol de metano. Esto puede ser expresado por medio de una ecuación simple:

$$\Delta H^\circ = -213 \text{ kcal/mol}$$

La letra griega delta (Δ) indica cambio, la H indica calor y el superíndice $^{\circ}$ indica que la reacción ocurre en ciertas condiciones estándar de temperatura y presión. El signo menos indica que se ha liberado energía.

De modo similar ocurren cambios de energía en las reacciones químicas que tienen lugar en los organismos. Sin embargo, como veremos en la Sección 2, los sistemas vivos han desarrollado estrategias para minimizar no sólo la energía requerida para iniciar una reacción, sino también la proporción de energía liberada como calor. Estas estrategias implican, entre otros factores, moléculas proteínicas especializadas, conocidas como **enzimas**, que son participantes esenciales de las reacciones químicas de los sistemas vivos. La palabra “estrategia” en su acepción corriente significa un plan deliberado para lograr un objetivo específico. Los biólogos, en cambio, la utilizan para significar un grupo de rasgos relacionados, desarrollados por los organismos sin una intencionalidad, bajo la influencia de la selección natural, y que resuelven problemas particulares encontrados por los sistemas vivos.

CARBOHIDRATOS

Los carbohidratos son las moléculas fundamentales de almacenamiento de energía en la mayoría de los seres vivos. Además, forman parte de diversas estructuras de las células vivas; las paredes de las células vegetales jóvenes, por ejemplo, contienen aproximadamente un 40% de celulosa, que es el compuesto orgánico más común en la biosfera.

Los **carbohidratos**, también llamados **glúcidos**, pueden ser moléculas pequeñas, conocidas como **azúcares**, o moléculas más grandes y complejas. Hay tres tipos principales de carbohidratos, clasificados de acuerdo con el número de moléculas de azúcar que contienen. Los **monosacáridos** (“azúcares simples”) como la ribosa, la glucosa y la fructosa, contienen sólo una molécula de azúcar. Los **disacáridos** consisten en dos moléculas de azúcar simples unidas covalentemente. Ejemplos familiares son la sacarosa (azúcar de caña), la maltosa (azúcar de malta) y la lactosa (azúcar de la leche). Los **polisacáridos** como la celulosa y el almidón, contienen muchas moléculas de azúcar simples unidas entre sí.

En general, las moléculas grandes, como los polisacáridos, que están constituidas de subunidades idénticas o similares, se conocen como **polímeros** (“muchas partes”) y las subunidades son llamadas **monómeros** (“una sola parte”) (véase el ensayo: *Representación de las moléculas*)

Los monosacáridos: energía lista para los sistemas vivos

Los monosacáridos son compuestos orgánicos constituidos por carbono, hidrógeno y oxígeno. Han sido descritos con la fórmula $(\text{CH}_2\text{O})_n$, donde n puede ser tan pequeño como tres, como en el caso del $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$, o llegar a ocho, como en $\text{C}_8\text{H}_{16}\text{O}_8$ (fig. 3-5). Estas proporciones originaron el término carbohidrato (“hidrato de carbono”) para los azúcares simples y las moléculas más grandes formadas por subunidades de azúcares.

Como se observa en la figura 3-5, los monosacáridos se caracterizan por la presencia de grupos hidroxilo y un grupo aldehído o cetona. Estos grupos funcionales constituyen azúcares altamente solubles en agua –y en soluciones acuosas–, y en moléculas que contienen más de cinco átomos de carbono, llevan a una reacción interna que cambia dramáticamente la conformación de la molécula. Cuando estos monosacáridos están en solución, el grupo aldehído o cetona tiene una tendencia a reaccionar con uno de los grupos hidroxilo, produciendo una estructura en anillo. En la glucosa, por ejemplo, el grupo aldehído del

Fig. 3-5. Dos modos diferentes de clasificar a los monosacáridos según el número de átomos de carbono y según los grupos funcionales, indicados aquí en color. El gliceraldehído, la ribosa y la glucosa contienen, además de los grupos hidroxilo, un grupo aldehído, que se indica en lila; se llaman azúcares de aldosa (aldosas). La dihidroxiacetona, la ribulosa y la fructosa contienen un grupo cetona, indicado en amarillo, y se llaman azúcares de cetosa (cetosas).

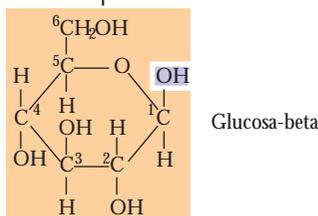
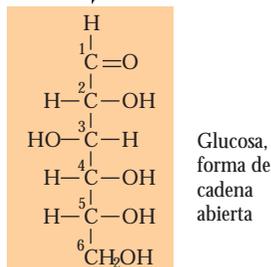
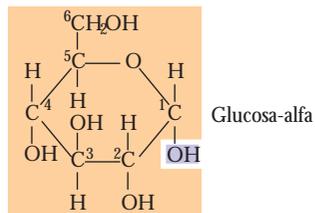
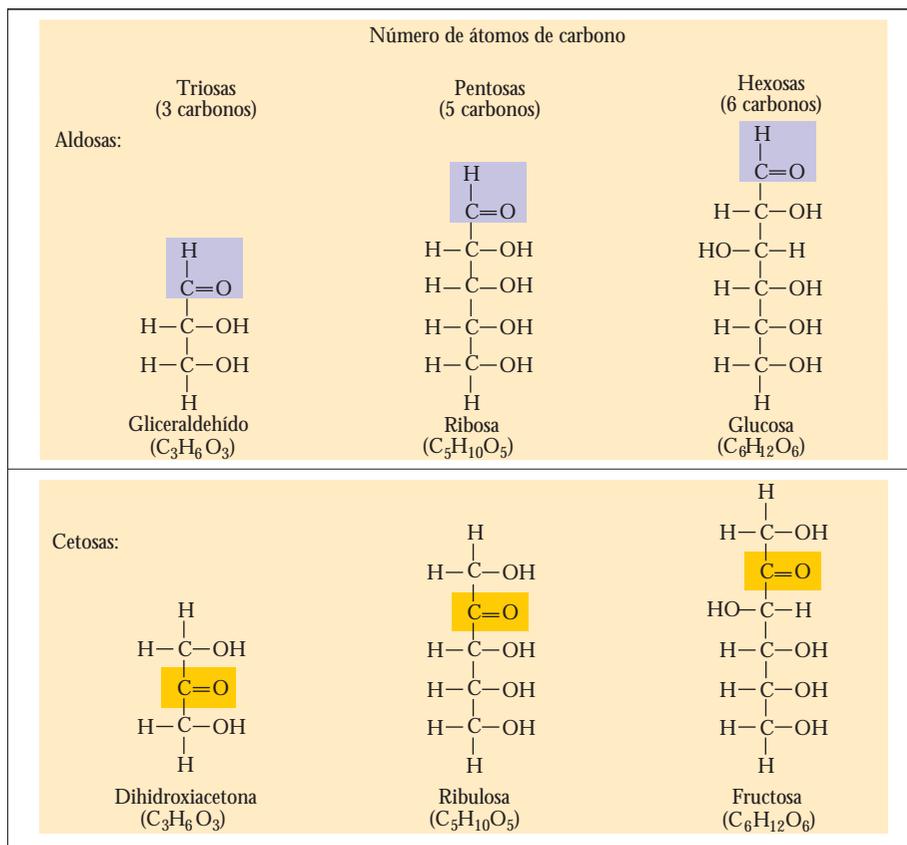
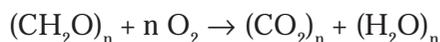


Fig. 3-6. En solución acuosa, la glucosa, azúcar de seis carbonos, existe en dos estructuras en anillo diferentes –alfa y beta– que están en equilibrio. La molécula pasa por la forma de cadena abierta en su transición de una forma estructural a la otra. La única diferencia en los dos anillos es la posición del grupo hidroxilo unido al átomo de carbono 1; en la forma alfa, está por debajo del plano del anillo y en la forma beta, por encima de éste.

primer átomo de carbono reacciona con el grupo hidroxilo del quinto átomo de carbono, produciendo un anillo de seis miembros, como se ve en la figura 3-6. Cuando se forma el anillo, puede cerrarse de dos maneras diferentes, estando ahora el grupo hidroxilo en el primer carbono, pero situado o bien por encima, o bien por debajo del plano del anillo. Cuando el grupo hidroxilo se encuentra debajo del plano se conoce como glucosa alfa, y cuando está por encima del plano se conoce como glucosa beta. Como veremos, esta pequeña diferencia entre las formas alfa y beta de la glucosa puede llevar a diferencias muy significativas en las propiedades de las moléculas más grandes formadas por los sistemas vivos a partir de la glucosa.

Al igual que los hidrocarburos, los monosacáridos pueden quemarse, u oxidarse, y así producir dióxido de carbono y agua:



Esta reacción, parecida a la combustión del metano, libera energía, y la cantidad de energía liberada como calor puede ser calculada quemando moléculas de azúcar en un calorímetro. Se libera la misma cantidad de energía, aunque de ningún modo tan inútilmente, cuando una cantidad equivalente de carbohidrato se oxida en una célula viva.

Esta afirmación, que compara la oxidación de las moléculas de alimento con la de las moléculas de combustible, no es una metáfora, sino un hecho. Por ejemplo, el costo energético de transportar un kilogramo de peso corporal a una distancia de un kilómetro es 0,95 kilocalorías para una paloma, 0,73 kcal para una persona y 0,83 kcal para un auto como un Cadillac. Retomaremos los procesos energéticos en la Sección 2.

Representación de las moléculas

Como vimos en los capítulos 1 y 2, los químicos han ideado varios modelos para representar las estructuras de los átomos y de las moléculas. Cada uno de estos modelos representa una manera de organizar un conjunto particular de conceptos científicos y de enfocar la atención en características particulares de los átomos y las moléculas.

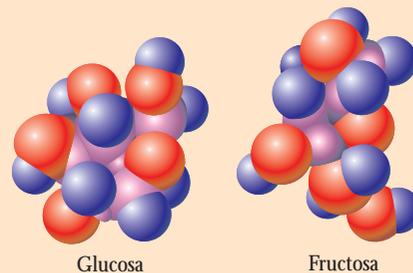
Dado que las propiedades de una molécula dependen de sus características tridimensionales, los modelos físicos frecuentemente resultan ser los más útiles. Por ejemplo, los modelos de esferas y varillas, del tipo de los que se muestran en la figura 3-1, subrayan la geometría de una molécula y, en particular, los enlaces entre los átomos. Pero estos modelos no llegan a sugerir la configuración general de la molécula creada por el movimiento de los electrones en sus orbitales.

Una mejor aproximación a la forma molecular es la que obtenemos a partir de los modelos compactos, en los que cada átomo se representa por el borde de sus orbitales exteriores. Sin embargo, los modelos compactos son engañosos, porque las moléculas no llenan el espacio de la misma manera que pensamos que lo hacen una mesa o una roca. Los átomos que constituyen las moléculas consisten principalmente en espacio vacío. Si el perímetro de los orbitales exteriores de los electrones de un átomo de oxígeno tuviera una longitud cercana a 200 m, el núcleo sería como una pelota de ping-pong colocada en el centro del espacio delimitado por los electrones.

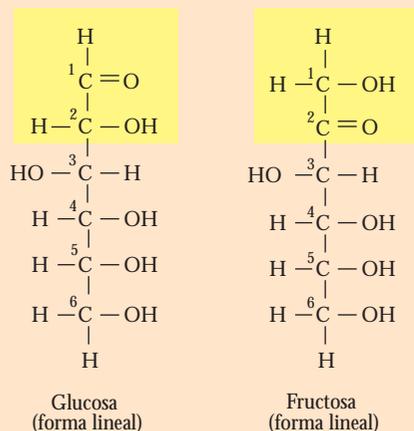
Lo que “colma” el espacio en las moléculas son las regiones de carga asociadas con el movimiento de los electrones alrededor del núcleo. Una molécula “ve” a otra molécula en función de estas regiones de carga. En consecuencia, la proteína que transporta moléculas de glucosa al interior de una célula viva no podrá transportar moléculas de fructosa, por ejemplo, a causa de la configuración diferente de las regiones de carga. Toda la bioquímica intrincada que se desarrolla en la célula se basa en la capacidad de las moléculas para “reconocerse” entre sí.

Los modelos de esferas y varillas y los modelos compactos se usan frecuentemente en el laboratorio, pero son poco útiles dibujados en el papel, porque es necesario observarlos desde todos los ángulos para ver todos los átomos y sus enlaces. Las representaciones bidimensionales más exactas de la estructura molecular corresponden a los modelos orbitales, como los que se muestran en la figura 2-3. Sin embargo, para las moléculas que contienen más que unos pocos átomos los modelos orbitales resultan extremadamente complejos. Por eso, cuando se encuentran en los sistemas vivos, los químicos habitualmente usan fórmulas moleculares o fórmulas estructurales. Una fórmula molecular indica el número de átomos de cada tipo que hay dentro de la molécula, mientras que una forma estructural muestra cómo están unidos los átomos entre sí.

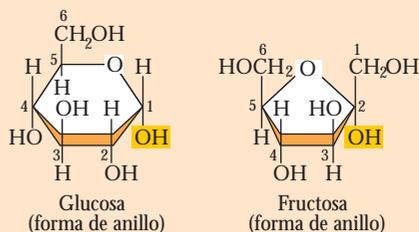
Modelo compacto de los azúcares glucosa y fructosa. Las esferas de color morado, casi completamente ocultas en el centro de cada molécula, representan a los átomos de carbono. Las esferas rojas en la superficie de cada molécula representan a los átomos de oxígeno, mientras que las azules representan a los átomos de hidrógeno.



La glucosa, por ejemplo, tiene seis átomos de carbono, doce de hidrógeno y seis de oxígeno. Su fórmula molecular es $C_6H_{12}O_6$. Pero la fructosa también contiene seis carbonos, doce hidrógenos y seis oxígenos, y tiene una estructura similar: una cadena de átomos de carbono a los que están unidos los átomos de hidrógeno y los de oxígeno. Las diferencias entre la glucosa y la fructosa se deben a que los átomos de carbono a los que se unen los otros átomos no son los mismos. Por lo tanto, las moléculas pueden distinguirse según sus fórmulas estructurales:



O representándolas en forma de anillo:



Los bordes inferiores de los anillos se dibujan más gruesos para sugerir su estructura tridimensional. Por convención, los átomos de carbono situados en las intersecciones de los enlaces en una estructura orgánica en anillo se “sobrentienden” y no se indican. Aunque no es necesario numerar los átomos de carbono, el hacerlo facilita a menudo la interpretación de la fórmula estructural.

Nótese que la reacción que lleva a la formación de las estructuras en anillo de la fructosa implica al grupo cetona, que está en el carbono 2, y al grupo hidroxilo, en el carbono 5. El resultado es un anillo de cinco miembros que tiene una apariencia general muy diferente de la del anillo de seis miembros formado por la glucosa. En el carbono 2 se encuentra el grupo hidroxilo, cuya posición por encima o por debajo del plano del anillo es la que determina si la molécula será la fructosa alfa o la fructosa beta.

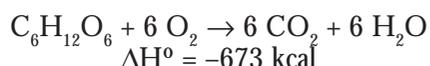
En azúcares que en solución forman estructuras en anillo, las posiciones de los grupos hidroxilos que no participan en la formación del anillo se determinan fácilmente: los grupos $-\text{OH}$ que aparecen en el lado izquierdo de la fórmula estructural para la cadena lineal están por encima del plano del anillo, y los grupos $-\text{OH}$ que aparecen en el lado derecho de la fórmula estructural están por debajo del plano del anillo.

Aunque las fórmulas estructurales no proporcionan una información exacta acerca de la configuración de las regiones de carga que son tan críticas en las reacciones biológicas, dan más información que la que resulta aparente a primera vista. Veremos que son una herramienta útil cuando examinemos las moléculas implicadas en las estructuras y procesos de los sistemas vivos.

Fig. 3-7. En el curso del tiempo evolutivo, muchos animales han desarrollado mecanismos muy sensibles que les permiten detectar azúcares. La mosca doméstica, por ejemplo, tiene sus detectores de azúcar en las patas. Cuando una mosca se posa sobre una gotita azucarada, su aparato bucal en forma de trompa inmediatamente se extiende y empieza a sorber. Nosotros también tenemos detectores especializados para el dulce que se encuentran en la lengua. Las moscas reaccionan a las mismas sustancias azucaradas que nosotros, aunque su sensibilidad es 10 millones de veces mayor que la nuestra. Cuando se consumen los productos vegetales azucarados de las plantas, las moscas, los humanos y otros animales obtienen no sólo un rico suministro de energía, sino también otros nutrientes esenciales, como proteínas, lípidos, vitaminas y minerales.



La fuente principal de energía para los humanos y otros vertebrados es el monosacárido glucosa, que es la forma en que el azúcar se transporta generalmente en el cuerpo animal (fig. 3-7). Un paciente que recibe alimentación endovenosa en un hospital obtiene glucosa disuelta en una solución salina cuya composición iónica se asemeja a la de los fluidos corporales. La glucosa disuelta es llevada por el torrente sanguíneo a las células del cuerpo en que ocurren las reacciones que liberan energía. Si se la mide en un calorímetro, la oxidación de un mol de glucosa libera 673 kilocalorías:



Disacáridos: formas de transporte

Aunque la glucosa es el azúcar común de transporte de los vertebrados, a menudo los azúcares son transportados en otros organismos como disacáridos. La sacarosa, comúnmente llamada azúcar de caña, es la forma común en la cual el azúcar se transporta en las plantas, desde las células fotosintéticas (principalmente en las hojas), donde se la produce, a otras partes del cuerpo vegetal. La sacarosa está compuesta por los monosacáridos glucosa y fructosa. El azúcar es transportada a través de la sangre de muchos insectos en forma de otro disacárido, la trehalosa, que consiste en dos unidades de glucosa enlazadas. Otro disacárido común es la lactosa, azúcar que existe sólo en la leche. La lactosa está constituida por glucosa combinada con otro monosacárido, la galactosa.

En la síntesis de una molécula de disacárido a partir de dos moléculas de monosacárido, se elimina una molécula de agua en el proceso de formación del nuevo enlace entre los dos monosacáridos (fig. 3-8). Este tipo de reacción química, que ocurre durante la síntesis de la mayoría de los polímeros orgánicos a partir de sus subunidades, se conoce como **condensación**. Así, solamente los monómeros libres de los carbohidratos tienen en realidad la relación CH_2O , porque dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno son eliminados cada vez que se forma un enlace durante la síntesis.

Cuando un disacárido se escinde en sus unidades de monosacárido, lo cual ocurre cuando se lo usa como fuente de energía, la molécula de agua vuelve a añ-

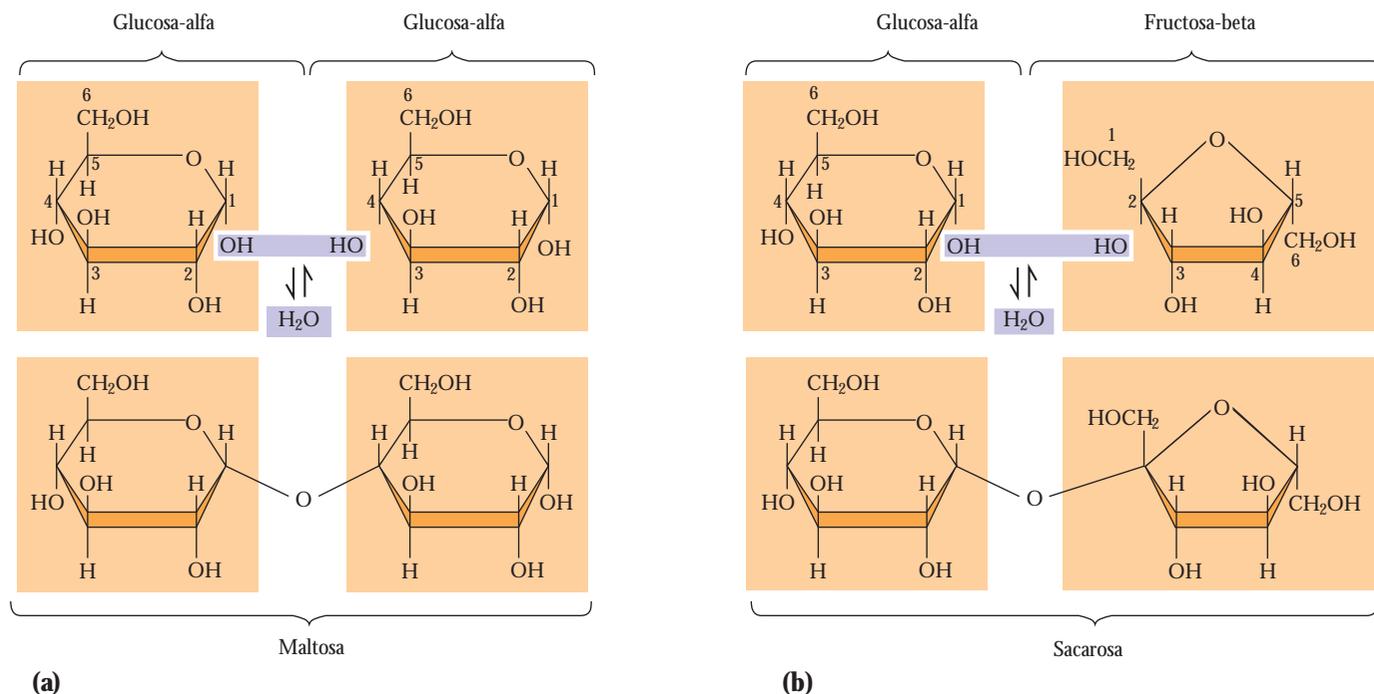


Fig. 3-8. Las reacciones de condensación producen dos disacáridos comunes. **a)** La maltosa es un disacárido constituido por dos unidades de glucosa alfa, unidas en lo que se conoce como enlace $1 \rightarrow 4$ (la unión entre los dos anillos implica al carbono 1 de una subunidad de glucosa y al carbono 4 de la otra). **b)** La sacarosa es un disacárido formado por una unidad de glucosa alfa y una unidad de fructosa beta unidas en un enlace $1 \rightarrow 2$ (el enlace entre los dos anillos implica al carbono 1 de la glucosa y al carbono 2 de la fructosa). Para representar este enlace en el papel, debemos rotar 180 grados la fórmula estructural de la glucosa beta (derecha a izquierda), lo cual tiene el efecto desconcertante de poner todo "patas arriba" a nuestros ojos. No obstante, en el mundo tridimensional en el que existen realmente las moléculas la formación de este enlace $1 \rightarrow 2$ no crea problema alguno. Como puede verse, las reacciones de condensación que producen estos disacáridos implican la eliminación de una molécula de agua. Para que se escindan nuevamente en sus monosacáridos constituyentes, se requiere la adición de una molécula de agua (hidrólisis).

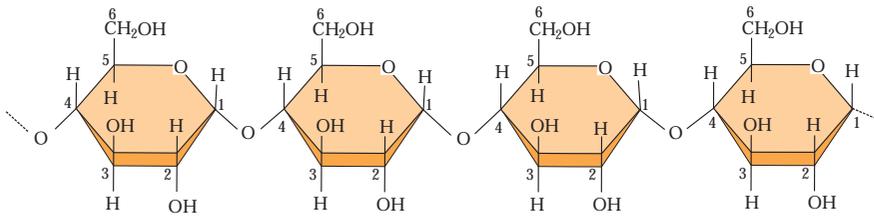
dirse. Esta escisión se conoce como **hidrólisis**, de *hidro* que significa "agua" y *lisis* que significa "separar". La hidrólisis es una reacción que libera energía. La hidrólisis de la sacarosa, por ejemplo, libera 5,5 kilocalorías por mol. De modo inverso, la formación de sacarosa a partir de glucosa y fructosa requiere un ingreso de energía de 5,5 kilocalorías por mol de sacarosa.

Polisacáridos de almacenamiento

Los polisacáridos están constituidos por monosacáridos unidos en cadenas largas. Algunos de ellos son formas de almacenamiento del azúcar. El **almidón**, por ejemplo, es la principal reserva alimenticia de la mayoría de las plantas. Una papa contiene almidón producido a partir del azúcar formado en las hojas verdes de la planta; el azúcar se transporta a las estructuras subterráneas y se acumula allí, en una forma adecuada para el almacenamiento de invierno, después de lo cual se utilizará para el crecimiento nuevo durante la primavera. El almidón tiene dos formas: la amilosa y la amilopectina, ambas formadas por unidades de glucosa acopladas (fig. 3-9).

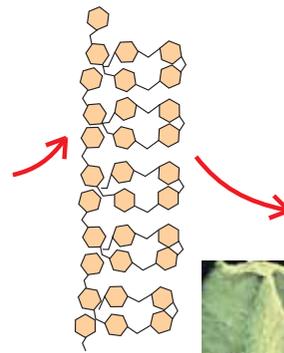
El **glucógeno** es la principal forma de almacenamiento del azúcar en la mayoría de los animales. El glucógeno tiene una estructura muy semejante a la de la amilopectina, salvo que es mucho más ramificado; las ramificaciones aparecen cada 8 a 10 unidades de glucosa. En los vertebrados, el glucógeno se almacena principalmente en el hígado y el tejido muscular. Si hay un exceso de glucosa en el torrente sanguíneo, el hígado forma glucógeno. Cuando la concentración de glucosa en la sangre cae, la hormona glucagón, producida por el páncreas, se descarga en el torrente sanguíneo; el glucagón estimula al hígado para hidrolizar el glucógeno a glucosa, la cual entra en la sangre.

La formación de polisacáridos a partir de monosacáridos requiere energía. Sin embargo, cuando la célula necesita energía, estos polisacáridos pueden ser hidrolizados, liberando monosacáridos que a su vez pueden oxidarse, suministrando energía para el trabajo celular.

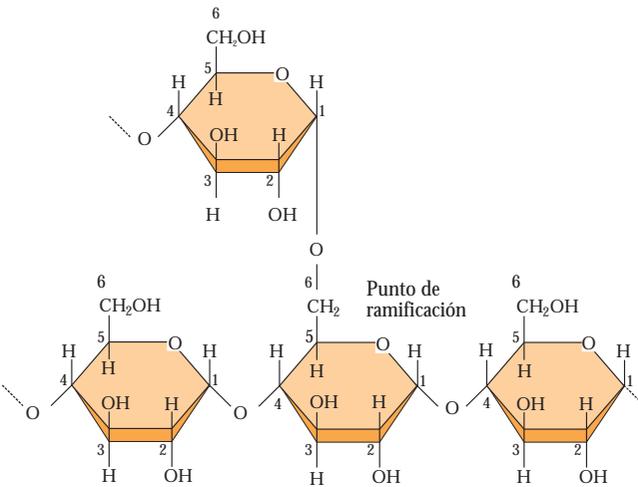


Amilosa - cadena lineal de subunidades de glucosa

(a)

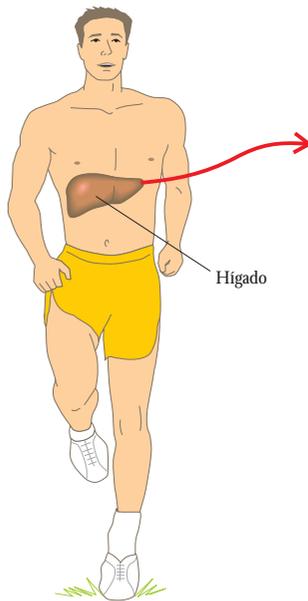
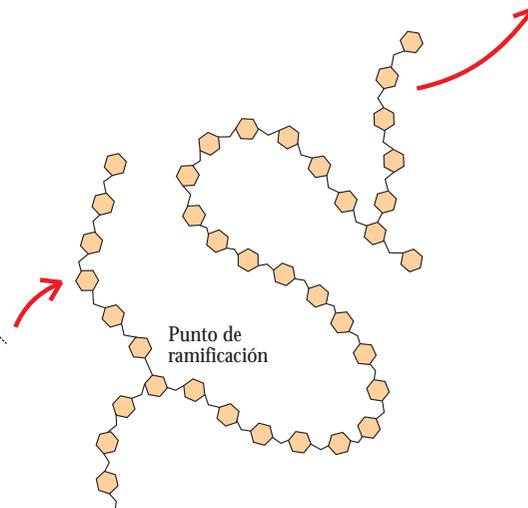


(c)

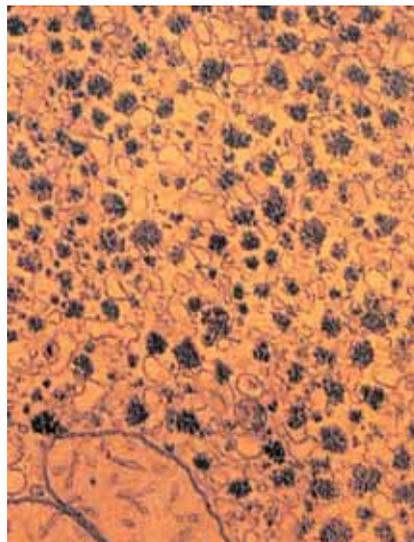


Amilopectina - cadena ramificada de subunidades de glucosa

(b)



Higado



(d)

Fig. 3-9. En las plantas, los azúcares se almacenan en forma de almidón. El almidón está compuesto de dos tipos diferentes de polisacáridos, la amilosa y la amilopectina. **a)** Una sola molécula de amilosa puede contener 1.000 o más unidades de glucosa alfa, en las que el carbono 1 de un anillo está unido al carbono 4 del siguiente en una cadena larga, no ramificada, que se enrosca para formar una hélice. **b)** Una molécula de amilopectina puede contener de 1.000 a 6.000 unidades de glucosa alfa; la cadena principal se ramifica periódicamente en cadenas cortas que contienen entre 24 y 36 unidades de glucosa alfa. **c)** Las moléculas de almidón, tal vez a raíz de su naturaleza helicoidal, tienden a agruparse en gránulos. En esta microfotografía electrónica de barrido de una sola célula almacenadora de papa, los objetos esféricos y ovoides son gránulos de almidón. Están aumentados aproximadamente mil veces. **d)** El glucógeno, que es la forma más común de almacenamiento del azúcar en los vertebrados, se asemeja a la amilopectina en su estructura general, excepto que cada rama contiene sólo entre 16 y 24 unidades de glucosa alfa. Los gránulos oscuros en esta célula hepática, aumentados aproximadamente 55.000 veces, están constituidos por glucógeno. Cuando se necesita glucosa, ésta se obtiene a partir de la hidrólisis del glucógeno.

Polisacáridos estructurales

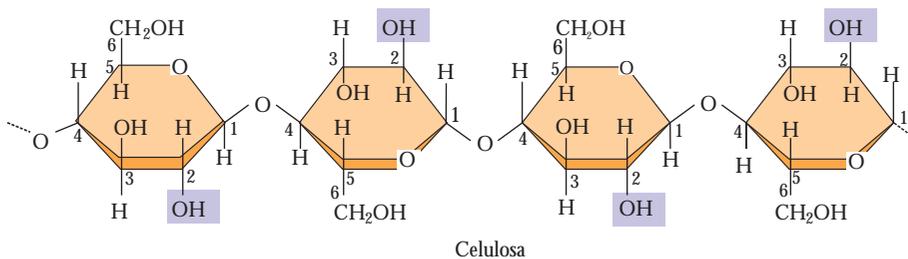
Una función principal de las moléculas en los sistemas vivos es formar los componentes estructurales de las células y de los tejidos. La principal molécula estructural de las plantas es la **celulosa**. De hecho, la mitad de todo el carbono orgánico de la biosfera está contenido en la celulosa. La madera es aproximadamente 50% de celulosa y el algodón es celulosa casi pura.

Las moléculas de celulosa forman la parte fibrosa de la pared de las células vegetales. Las fibras de celulosa, incluidas en una matriz de polisacáridos de otros tipos, forman una envoltura externa alrededor de la célula vegetal. Cuando la célula es joven, esta envoltura es flexible y se estira a medida que la célula crece, pero se hace cada vez más gruesa y más rígida a medida que la célula madura. En algunos tejidos vegetales, tales como los tejidos que forman el leño y la corteza, las células finalmente mueren, dejando solamente sus paredes externas rígidas.

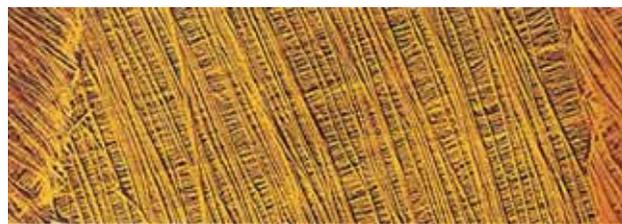
La celulosa es un polímero compuesto de monómeros de glucosa, así como lo son el almidón y el glucógeno. Éstos pueden ser utilizados fácilmente como combustible por casi todos los tipos de sistemas vivos, pero sólo unos pocos microorganismos (ciertas bacterias, protozoarios y hongos) pueden hidrolizar celulosa. Las vacas y otros rumiantes, las termitas y las cucarachas pueden utilizar a la celulosa como fuente de energía sólo gracias a los microorganismos que habitan en sus aparatos digestivos.

Para comprender las diferencias entre los polisacáridos estructurales –como la celulosa– y los polisacáridos de almacenamiento de energía –como el almidón o el glucógeno– debemos considerar nuevamente la molécula de glucosa. Se recordará que esta molécula es básicamente una cadena de seis átomos de carbono y que cuando está en solución, tal como ocurre en la célula, adopta una forma en anillo. El anillo puede estar cerrado de dos maneras distintas, adoptando la forma alfa o la forma beta (véase fig. 3-6). Ambas formas están en equilibrio; un cierto número de moléculas cambian de una forma a la otra constantemente, usando como paso intermedio la estructura de cadena abierta. El almidón y el glucógeno están constituidos completamente por unidades alfa. La celulosa, sin embargo, consiste íntegramente en unidades beta (fig. 3-10). Esta ligera diferencia ejerce un profundo efecto sobre la estructura tridimensional de las moléculas, que se alinean en paralelo, formando microfibrillas cristalinas de celulosa. Como resultado, la celulosa es impermeable a las enzimas que degradan tan exitosamente a los polisacáridos de almacenamiento.

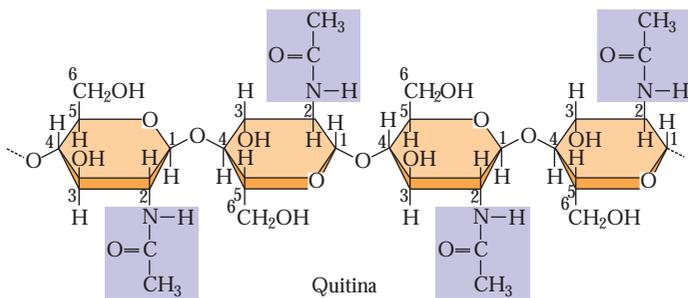
Fig. 3-10. a) La celulosa está formada por monómeros de glucosa beta, unidos en enlaces $1 \rightarrow 4$ (nótese que las fórmulas estructurales para las unidades alternadas de glucosa beta han sido rotadas 180°C para mostrar el enlace). En la celulosa, los grupos $-\text{OH}$ (indicados en color) que se proyectan a ambos lados de la cadena forman puentes de hidrógeno con grupos $-\text{OH}$ vecinos, dando como resultado la formación de haces de cadenas paralelas, unidas en forma transversal. Por el contrario, en la molécula de almidón (fig. 3-9), la mayoría de los grupos $-\text{OH}$ capaces de formar puentes de hidrógeno enfrentan el exterior de la hélice, haciéndola más soluble en el agua circundante. **b)** La pared de una célula vegetal joven está constituida casi en un 40% por celulosa. Cada una de las microfibrillas que se pueden ver aquí (aumentadas aproximadamente 30.000 veces) es un haz de cientos de cordones de celulosa, y cada cordón es una cadena de monómeros de glucosa beta (a). Las microfibrillas, fuertes como una cantidad equivalente de acero, están incluidas en otros polisacáridos, uno de los cuales es la pectina.



(a)



(b)



(a)

(b)



Fig. 3-11. a) La quitina es un polímero formado por monosacáridos modificados repetidos. Como se puede ver, el monómero es un azúcar de seis carbonos –como la glucosa– en el que un grupo que contiene nitrógeno ha reemplazado al grupo –OH del carbono 2.

b) Muda de una cigarra. Las cubiertas externas relativamente duras –o exoesqueleto– de los insectos contienen quitina. Dado que el exoesqueleto no crece cuando lo hace el insecto, debe ser mudado periódicamente. El exoesqueleto descartado está en la parte inferior, por debajo del insecto, cuyo nuevo exoesqueleto está endureciéndose.

La quitina, que es un componente principal de los exoesqueletos de los artrópodos, como los insectos y crustáceos, y también de las paredes celulares de muchos hongos, es un polisacárido modificado, resistente y duro (fig. 3-11). Al menos 900 mil especies diferentes de organismos pueden sintetizar quitina, y se ha calculado que los individuos que pertenecen a una sola especie de cangrejo producen varios millones de toneladas de quitina por año.

LÍPIDOS

Los lípidos son un grupo general de sustancia orgánicas insolubles en solventes polares como el agua, pero que se disuelven fácilmente en solventes orgánicos no polares, como el cloroformo, el éter y el benceno. Típicamente, los lípidos son moléculas de almacenamiento de energía, por lo común en forma de grasa o aceite, y cumplen funciones estructurales, como en el caso de los fosfolípidos, los glucolípidos y las ceras. Algunos lípidos, sin embargo, desempeñan papeles principales como “mensajeros” químicos, tanto dentro de las células como entre ellas.

Grasas y aceites: energía almacenada

A diferencia de muchas plantas, como la de la papa, los animales sólo tienen una capacidad limitada para almacenar carbohidratos. En los vertebrados, cuando los azúcares que se ingieren sobrepasan las posibilidades de utilización o de transformación en glucógeno, se convierten en grasas. Algunas plantas también almacenan energía en forma de aceites, especialmente en las semillas y en los frutos. Las grasas y los aceites contienen una mayor proporción de enlaces carbonohidrógeno, ricos en energía, que los carbohidratos y, en consecuencia, contienen más energía química. En promedio, las grasas producen aproximadamente 9,3 kilocalorías por gramo,* en comparación con las 3,79 kilocalorías por gramo de carbohidrato, o las 3,12 kilocalorías por gramo de proteína. También, dado que las grasas son no polares, no atraen moléculas de agua y, así, no están “embebidas” en éstas, como ocurre en el caso del glucógeno. Teniendo en cuenta el factor hídrico, las grasas almacenan seis veces más energía por gramo que el glucógeno, y éste es indudablemente el motivo por el cual, en el curso de la evolución, llegaron a desempeñar un papel fundamental en el almacenamiento de energía.

* 1.000 gramos de grasa (1 kilogramo) proporcionan en su oxidación 9.300 kcal, suficientes para mantener vivo a un hombre adulto durante 3 días.

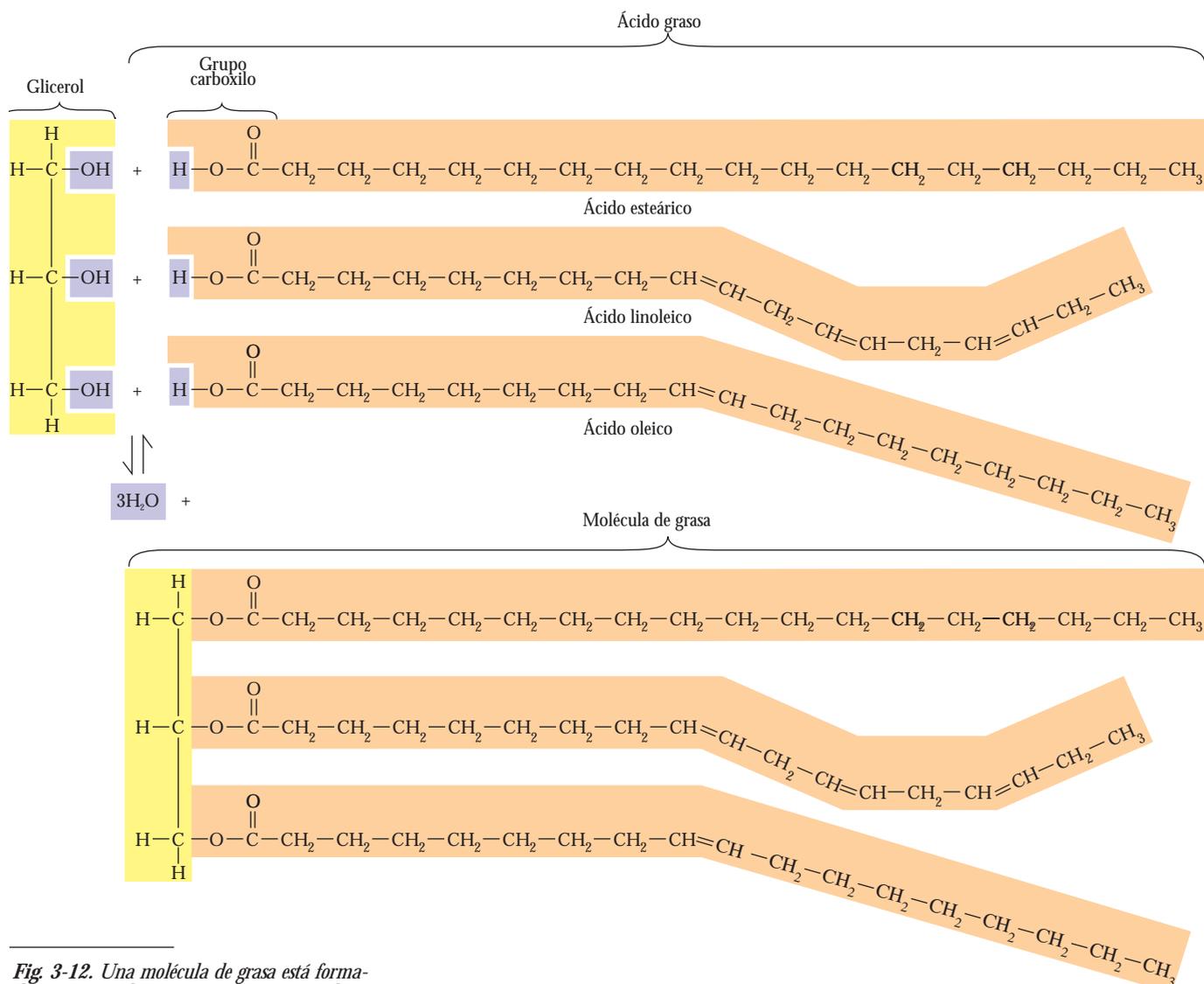


Fig. 3-12. Una molécula de grasa está formada por tres ácidos grasos unidos a una molécula de glicerol (de aquí el término "triglicérido"). Las largas cadenas hidrocarbonadas que componen los ácidos grasos terminan en grupos carboxilo ($-\text{COOH}$), que se unen covalentemente a la molécula de glicerol. Cada enlace se forma cuando una molécula de agua, señalada en lila, se elimina (condensación). Las propiedades físicas de una grasa, como por ejemplo su punto de fusión, están determinadas por las longitudes de sus cadenas de ácidos grasos y dependen también de si las cadenas son saturadas o no saturadas. Aquí se muestran tres tipos diferentes de ácidos grasos. El ácido esteárico está saturado, mientras que el ácido linoleico está insaturado como puede verse por los dobles enlaces en su cadena. El ácido oleico, con un doble enlace, es un ácido monoinsaturado; el ácido linoleico, con tres dobles enlaces, es poliinsaturado. Las cadenas rectas de los ácidos grasos saturados permiten el empaquetamiento de las moléculas, produciendo un sólido como la manteca o el cebo. En los ácidos grasos insaturados, los dobles enlaces provocan que las cadenas se doblen; esto tiende a separar las moléculas, produciendo un líquido como el aceite de oliva o de girasol.

Un ejemplo del valor de este almacenamiento de energía concentrado lo ofrecen los colibríes. Un colibrí garganta de rubí macho tiene un peso, libre de grasa, de 2,5 gramos. Migra cada otoño desde Florida (EE.UU.) a Yucatán (México), o sea, recorre aproximadamente 2.000 km. Antes de hacerlo, acumula 2 gramos de grasa corporal, una cantidad casi igual a su peso original. Sin embargo, si transportase las mismas reservas energéticas en forma de glucógeno, debería acarrear 5 gramos, el doble de su propio peso, sin grasa.

Una molécula de grasa consta de tres moléculas de ácido graso unidas a una molécula de glicerol. El glicerol, como vimos antes, es un alcohol de tres carbonos que contiene tres grupos hidroxilo. Un ácido graso es una cadena de hidrocarburo larga que termina en un grupo carboxilo ($-\text{COOH}$); la cadena no polar es hidrofóbica, mientras que el grupo carboxilo da a una porción de la molécula las propiedades de un ácido. Como ocurre con los disacáridos y los polisacáridos, cada enlace entre el glicerol y el ácido graso se forma por la eliminación de una molécula de agua (condensación), como se ve en la figura 3-12. Las moléculas de grasa, que también se conocen como triglicéridos, se dice que son neutras porque contienen grupos no polares. Como se esperaría, son extremadamente hidrofóbicas.

Los ácidos grasos, que raras veces se hallan en las células en estado libre (en general son parte de otra molécula), están formados por cadenas que contienen un número par de átomos de carbono, típicamente entre 14 y 22. Se conocen alrededor de setenta ácidos grasos diferentes. Difieren en la longitud de sus cadenas, en si la cadena contiene algún enlace doble (como en el ácido oleico), o no (como en el ácido esteárico), y en la posición que tenga en la cadena cualquier enlace doble (véase fig. 3-12). Un ácido graso, como el ácido esteárico, en el cual no hay enlaces dobles, se dice que es *saturado*, porque las posibilidades de enlace están completas para todos los átomos de carbono de la cadena (o sea cada átomo de carbono ha formado enlaces con otros cuatro átomos). Un ácido graso, como el oleico, que contiene átomos de carbono unidos por enlaces dobles, se dice que es *no saturado*, porque sus átomos de carbono tienen el potencial para formar enlaces adicionales con otros átomos.

Las grasas no saturadas, que tienden a ser líquidos oleosos, son más comunes en las plantas que en los animales. Ejemplos son el aceite de oliva, el aceite de maní y el aceite de maíz. Las grasas animales, como la manteca o el tocino, contienen ácidos grasos saturados y habitualmente sus temperaturas de fusión son más elevadas por lo que, a temperatura ambiente, se presentan como sólidos.

Grasas, azúcares y calorías

Como notamos con anterioridad, cuando se ingieren carbohidratos más allá de los requerimientos energéticos del cuerpo, se almacenan temporariamente como glucógeno o, de manera más permanente, como grasas. De modo inverso, cuando los requisitos energéticos del cuerpo no son satisfechos por la ingestión inmediata de comida, el glucógeno y posteriormente la grasa son degradados para llenar estos requerimientos. El hecho de que el cuerpo consuma o no sus propias moléculas de almacenamiento no guarda ninguna relación con la forma molecular en que la energía ingresa en él. La cuestión estriba simplemente en la cantidad de calorías que se libera cuando se degradan estas moléculas.

En general, la grasa se almacena en dos tipos de tejido adiposo: el blanco y el pardo. Ambos se caracterizan por un elevado contenido de grasas en el citoplasma de sus células. Pero ahí terminan sus semejanzas. El tejido adiposo blanco almacena grasas en forma de triglicéridos que después son exportados a los demás tejidos. Los triglicéridos son utilizados para obtener energía en períodos entre comidas o de ayuno o cuando el ingreso de energía es menor que su consumo. La maquinaria metabólica del tejido blanco es, pues, escasa, como corresponde a un tejido de almacenamiento. Por el contrario, el tejido adiposo pardo posee una extraordinaria capacidad metabólica y sus lípidos se consumen *in situ* para generar calor. La masa de este tejido no permanece constante a lo largo de la vida de un individuo. Es muy abundante en los recién nacidos y en la vida adulta varía mucho de acuerdo con el tamaño y los hábitos de vida de la especie.

Aislantes y amortiguadores

Grandes masas de tejido graso rodean a algunos órganos como, por ejemplo, a los riñones de los mamíferos, y sirven para protegerlos de una conmoción física. Por razones que no se comprenden, estos depósitos de grasa permanecen intactos, aun en épocas de inanición. Otra característica de los mamíferos es una capa de grasa que se encuentra debajo de la piel y que sirve como aislante térmico. Esta capa está particularmente bien desarrollada en los mamíferos marinos (fig. 3-13).



Fig. 3-13. Esta foca lira, o foca de silla, que descansa sobre un témpano de hielo en el golfo de Saint Lawrence, está bien aislada por una gruesa capa de grasa debajo de su piel, la cual cumple la misma función que el atuendo de un buzo.

Entre los seres humanos, las mujeres se caracterizan por tener una capa de grasa subdérmica (“bajo la piel”) más gruesa que la de los hombres. Esta capacidad de almacenar grasa, aunque no es muy admirada en la civilización actual, indudablemente fue muy valiosa hace diez mil años o más. En esos tiempos, según sabemos, no existía otra manera de almacenar alimentos, y esta grasa adicional, no solamente nutría a la mujer sino, lo que era más importante, al feto y al lactante, cuya capacidad para ayunar sin peligro es mucho menor que la de un adulto. Así, muchas de nosotras estamos suprimiendo penosamente, mediante dietas, la capacidad de acumulación que nos legaron milenios de evolución.

Fosfolípidos y glucolípidos

Los lípidos, especialmente los fosfolípidos y los glucolípidos, también desempeñan papeles estructurales extremadamente importantes. Al igual que las grasas, tanto los fosfolípidos como los glucolípidos están compuestos de cadenas de ácidos grasos unidas a un esqueleto de glicerol. En los **fosfolípidos**, no obstante, el tercer carbono de la molécula de glicerol no está ocupado por un ácido graso, sino por un grupo fosfato (fig. 3-14), al que está unido habitualmente otro grupo polar. Los grupos fosfato están cargados negativamente. Como resultado, el extremo fosfato de la molécula es hidrofílico, mientras que las porciones de ácido graso son hidrofóbicas. Las consecuencias se muestran en la figura 3-15. Como veremos en el capítulo 6, esta disposición de las moléculas de fosfolípido, con sus cabezas hidrofílicas expuestas y sus colas hidrofóbicas agrupadas, forma la base estructural de las membranas celulares.

En los **glucolípidos** (“lípidos con azúcar”), el tercer carbono de la molécula de glicerol no está ocupado por un grupo fosfato, sino por una cadena de carbohidrato corta. Dependiendo del glucolípidos particular, esta cadena puede contener, en cualquier lugar, entre uno y quince monómeros de monosacárido. Al igual que la cabeza de fosfato de un fosfolípido, la cabeza de carbohidrato de un glucolípidos es hidrofílica, y las colas de ácidos grasos son, por supuesto, hidrofóbicas. En solución acuosa, los glucolípidos se comportan del mismo modo que los fosfolípidos. También son componentes importantes de las membranas celulares en las que cumplen funciones de reconocimiento celular.

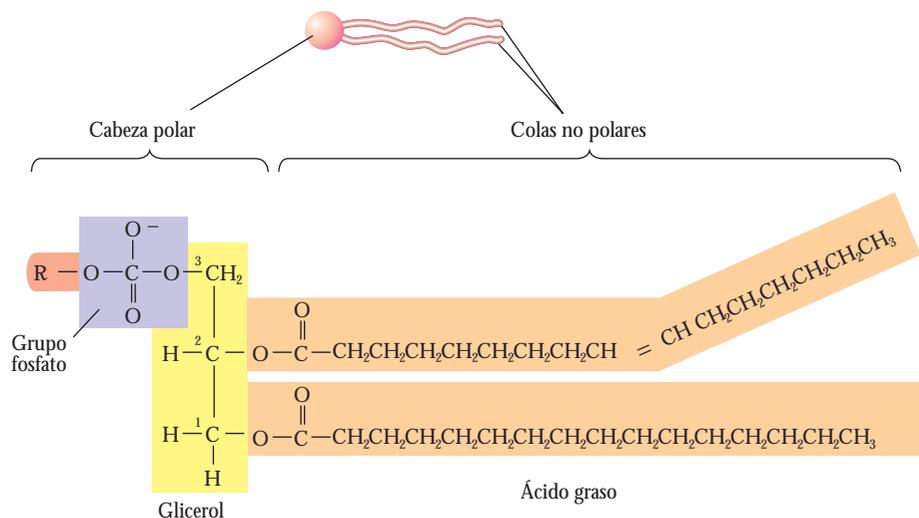


Fig. 3-14. La molécula de fosfolípido está formada por dos ácidos grasos unidos a una molécula de glicerol, como en las grasas, y por un grupo fosfato (indicado en lila) unido al tercer carbono del glicerol. También contiene habitualmente un grupo químico adicional, indicado con la letra R. Las “colas” de ácido graso son no polares y, por lo tanto, insolubles en agua (hidrofóbicas); la “cabeza” polar que contiene a los grupos fosfato y R es soluble (hidrofílica).

Fig. 3-15. a) Dado que los fosfolípidos tienen cabezas solubles en agua y colas insolubles en ella (fig. 3-14), tienden a formar una película delgada en una superficie acuosa, con sus colas extendidas por encima del agua. b) Rodeados de agua, se distribuyen espontáneamente en dos capas, con sus cabezas hidrofílicas (amantes del agua) extendidas hacia afuera y sus colas hidrofóbicas (con aversión al agua) hacia adentro. Esta disposición, la bicapa lipídica, constituye la base estructural de las membranas celulares. c) Al formar una bicapa, los componentes hidrofóbicos de los fosfolípidos quedan "protegidos" del agua, excepto en los bordes, en donde quedan expuestos. Esta ordenación da una cierta inestabilidad a esa membrana, haciendo que ésta se pliegue sobre sí misma y forme vesículas.

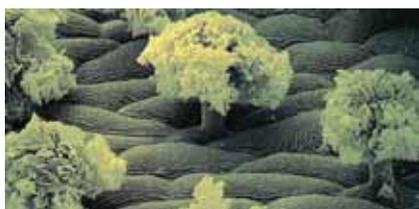
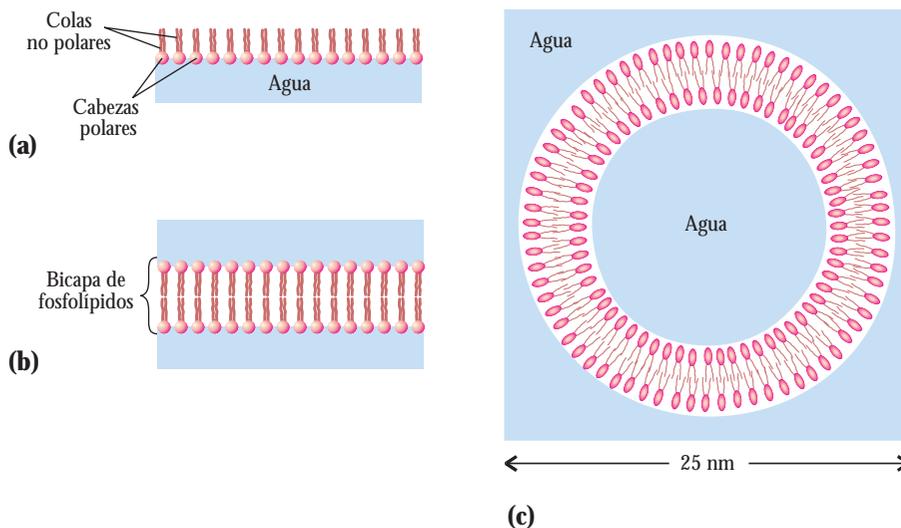


Fig. 3-16. Esta microfotografía electrónica de barrido muestra las glándulas productoras de cera en la superficie externa de una yema floral. Las estructuras pedunculadas son las glándulas y el material esponjoso sobre el pedúnculo es la cera que han producido. Los depósitos de cera están aumentados 300 veces, y pueden ser tan abundantes y voluminosos que la planta parece estar espolvoreada de harina.

Ceras

Las ceras también son una forma de lípido. Son producidas, por ejemplo, por las abejas para construir sus panales. También forman cubiertas protectoras, lubricantes e impermeabilizantes sobre la piel, el pelaje y las plumas y sobre los exoesqueletos de algunos animales. En las plantas terrestres se encuentran sobre las hojas y los frutos (fig. 3-16). Las ceras protegen las superficies donde se depositan de la pérdida de agua y aíslan del frío a los tejidos internos.

Colesterol y otros esteroides

El colesterol pertenece a un grupo importante de compuestos conocidos como esteroides (fig. 3-17). Aunque los esteroides no se asemejan estructuralmente a los otros lípidos, se los agrupa con ellos porque son insolubles en agua. Al igual que el colesterol, todos los esteroides tienen cuatro anillos de carbono unidos y varios de ellos tienen una cola. Además, muchos poseen el grupo funcional $-OH$, que los identifica como alcoholes.

El colesterol se encuentra en las membranas celulares (excepto en las células bacterianas); aproximadamente el 25% (en peso seco) de la membrana de un glóbulo rojo es colesterol. Su presencia da rigidez a las membranas y evita su congelamiento a muy bajas temperaturas. También es un componente principal de la vaina de mielina, la membrana lipídica que envuelve a las fibras nerviosas de conducción rápida, acelerando el impulso nervioso. El colesterol es sintetizado en el hígado a partir de ácidos grasos saturados y también se obtiene de la dieta, principalmente de la carne, el queso y las yemas de huevo. Las altas concentraciones de colesterol en la sangre están asociadas con la aterosclerosis, enfermedad en la cual el colesterol se encuentra en depósitos grasos en el interior de los vasos sanguíneos afectados (véase el ensayo: *Regulación del colesterol en la sangre*).

Las hormonas sexuales y las hormonas de la corteza adrenal (la porción más externa de las glándulas suprarrenales, que se encuentran por encima de los riñones) también son esteroides. Estas hormonas se forman a partir del colesterol en los ovarios, los testículos, la corteza suprarrenal y otras glándulas que las producen. Las prostaglandinas representan un grupo de lípidos derivados de los ácidos grasos y tienen acciones hormonales. Tanto las hormonas esteroides como las prostaglandinas serán tratadas con más detalle en la Sección 7.

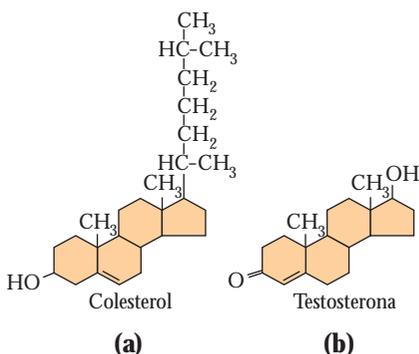


Fig. 3-17. Dos ejemplos de esteroides. a) La molécula de colesterol está formada por cuatro anillos de carbono y una cadena hidrocarbonada. b) La testosterona, hormona sexual masculina, sintetizada a partir del colesterol por células de los testículos, también tiene la estructura característica de cuatro anillos, pero carece de la cola hidrocarbonada.

Regulación del colesterol en la sangre

Aunque el colesterol desempeña papeles esenciales en el cuerpo animal, también es el villano principal en la enfermedad cardíaca. Los depósitos que contienen colesterol pueden estrechar las arterias que llevan sangre al músculo cardíaco, y las personas con cantidades inusualmente grandes de colesterol en su sangre corren un alto riesgo de padecer ataques cardíacos. ¿Cómo regula el cuerpo los niveles de colesterol? ¿Qué es lo que funciona mal como para elevar esos niveles? ¿Cómo ocasiona el colesterol los ataques cardíacos? Dado el hecho de que la enfermedad cardíaca es la principal causa de muerte en los países desarrollados, estas preguntas no sólo son de interés biológico, sino que también son importantes para cualquier persona.

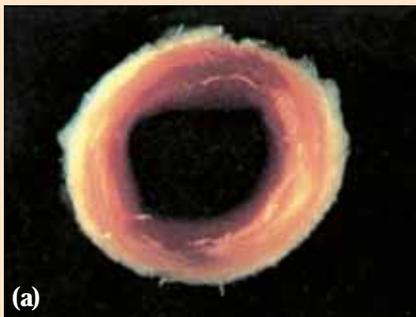
El órgano central en la regulación del colesterol es el hígado, que no sólo sintetiza la cantidad necesaria a partir de los ácidos grasos saturados, sino que degrada el exceso de colesterol circulante en la sangre, como resultado, por ejemplo, de una dieta rica en leche, queso, carne y yemas de huevo. El colesterol es transportado por el torrente sanguíneo hacia las células del organismo, y desde ellas, incluyendo las del hígado. Sin embargo, al igual que otros lípidos, el colesterol es insoluble en agua y, por lo tanto, en el plasma, que es la porción fluida de la sangre. Es transportado por partículas que consisten en un interior de colesterol y una "envoltura" lipídica que tiene proteínas solubles en agua incluidas en su superficie externa. Estos grandes complejos existen en dos formas principales: lipoproteínas de baja densidad (LDL) y lipoproteínas de alta densidad (HDL). Las LDL funcionan como los camiones de reparto del sistema, llevando el colesterol de la dieta y el colesterol recién sintetizado a varios destinos en el cuerpo, incluyendo el hígado y los órganos sintetizadores de hormonas. Las HDL, sin embargo, funcionan más como camiones de basura, llevando el exceso de colesterol al hígado, en un viaje de un solo sentido para su degradación y su excreción.

En condiciones normales, el sistema está balanceado, y el hígado sintetiza o degrada colesterol según las necesidades cotidianas del cuerpo y la cantidad de colesterol circulante. No obstante, puede desequilibrarse por cierto número de factores. Si, por ejemplo, la ingestión de colesterol en

la dieta es elevada, el hígado se ve superado y no puede degradar todo el exceso. Si la ingestión de grasas saturadas es elevada, el hígado aumenta su síntesis de esteroides, aun en ausencia de una alta ingestión de colesterol. La evidencia actual indica que el hígado vigila el nivel de colesterol en la sangre a través de la captación de LDL, para lo cual las superficies celulares cuentan con receptores especializados. Si estos receptores están ausentes o dañados, las células hepáticas continúan sintetizando y exportando colesterol en forma de LDL, aun cuando los niveles de colesterol en sangre sean elevados.

Cuando las cantidades de LDL circulantes son mayores que las que pueden ser captadas por el hígado y por los órganos que sintetizan hormonas, serán tomadas por las células que tapizan las arterias que irrigan el corazón. Esto, finalmente, conducirá a un bloqueo total de esas arterias y, así, a un ataque cardíaco.

La enfermedad cardíaca aparece frecuentemente en miembros de una misma familia, sugiriendo que en algunos casos hay factores hereditarios implicados. En un tipo de enfermedad cardíaca hereditaria, las células del organismo no tienen receptores para LDL. Los individuos con esta enfermedad tienen entre seis y ocho veces más colesterol en su sangre que la cantidad normal, y habitualmente tienen su primer ataque en la niñez y mueren por enfermedad cardíaca en la segunda década de la vida. Otras familias parecen estar protegidas contra la enfermedad cardíaca, aparentemente porque los organismos de sus miembros sintetizan grandes cantidades de HDL, asegurando que todo el exceso de colesterol efectúe un rápido viaje, de un solo sentido, al hígado. Para la mayoría de nosotros, sin embargo, el grado de riesgo depende de nuestra conducta: si hacemos ejercicios regularmente, en cierta forma nos protegemos contra la acumulación de colesterol ya que la actividad física parece incrementar los niveles de HDL. Si fumamos tabaco, que aparentemente produce una disminución en los niveles de HDL, estamos aumentando el riesgo de enfermedad cardíaca. La cantidad de colesterol y de grasa saturada que ingerimos también determina, en parte, los niveles de colesterol en nuestro organismo.



En un tipo de enfermedad cardíaca, la aterosclerosis, el colesterol y otras sustancias grasas se acumulan en las paredes de las arterias coronarias que irrigan el músculo cardíaco. Esta acumulación genera crecimiento anormal y producción de tejidos fibrosos por parte de las células de las

paredes. a) Arteria coronaria normal. b) Corte transversal de una arteria coronaria en la cual se ha desarrollado una aterosclerosis moderada. Se han formado depósitos de grasa y el espacio que queda para el flujo de sangre ha disminuido significativamente. c) Arteria coronaria en la

cual los depósitos se han hecho tan grandes, que sólo queda abierto un canal muy estrecho. Este canal estrecho puede ser completamente bloqueado por un coágulo sanguíneo. El resultado es un ataque cardíaco y la muerte del músculo cardíaco irrigado por la arteria afectada.

Cuadro 3-2. Funciones biológicas de las proteínas

<i>Tipos de proteínas*</i>	<i>Ejemplos</i>
Proteínas estructurales	Colágeno, seda, cubiertas virales, microtúbulos
Proteínas reguladoras	Insulina, ACTH, hormona de crecimiento
Proteínas contráctiles	Actina, miosina
Proteínas de transporte	Hemoglobina, mioglobina
Proteínas de almacenamiento	Clara de huevo, proteína de las semillas
Proteínas de defensa en la sangre de los vertebrados	Anticuerpos, complemento
Proteínas de membrana	Receptores, proteínas de transporte de membrana, antígenos
Toxinas	Toxina botulínica, toxina de la difteria
Enzimas	Sacarasa, pepsina

* Muchas de las proteínas que aparecen en esta lista serán comentadas en otras secciones del libro, particularmente en la Sección 7.

AMINOÁCIDOS Y PROTEÍNAS

Las proteínas figuran entre las moléculas orgánicas más abundantes; en la mayoría de los sistemas vivos constituyen hasta el 50% o más del peso seco. Solamente en las plantas, con su alto contenido en celulosa, las proteínas representan algo menos de la mitad del peso seco. Hay muchas moléculas de proteína diferentes: enzimas, hormonas, proteínas de almacenamiento, como las que se encuentran en los huevos de las aves y de los reptiles y en las semillas; proteínas de transporte como la hemoglobina; proteínas contráctiles, del tipo de las que se encuentran en el músculo; inmunoglobulinas (anticuerpos); proteínas de membrana y muchos tipos diferentes de proteínas estructurales (cuadro 3-2). Su diversidad funcional es abrumadora. En estructura, sin embargo, todas siguen el mismo esquema simple: todas son polímeros de aminoácidos, dispuestos en una secuencia lineal.

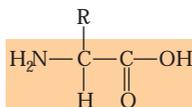
Las moléculas de proteínas contienen frecuentemente varias centenas de aminoácidos. Así, el número de diferentes secuencias de aminoácidos y, por lo tanto, la posible variedad de moléculas de proteínas es enorme, casi tan enorme como el número de diferentes oraciones que pueden escribirse con nuestro alfabeto de 28 letras. Sin embargo, los organismos tienen sólo una fracción muy pequeña de las proteínas que son teóricamente posibles. La bacteria unicelular *Escherichia coli*, por ejemplo, contiene simultáneamente entre 600 y 800 clases diferentes de proteínas, y la célula de un vegetal o de un animal tiene varias veces esa cantidad. En un organismo complejo hay, cuando menos, varios miles de proteínas diferentes, cada una con una función especial y cada una específicamente adecuada para esa función por su naturaleza química única.

Aminoácidos: las unidades estructurales de las proteínas

Cada aminoácido tiene la misma estructura fundamental: un átomo de carbono central unido a un grupo amino ($-\text{NH}_2$), a un grupo carboxilo ($-\text{COOH}$) y a un átomo de hidrógeno (fig. 3-18 a). En cada aminoácido también hay otro átomo o grupo de átomos (designado como "R") unido al carbono central. Co-

mo vimos en el capítulo 2 (pág. 56), el grupo amino es una base débil y el grupo carboxilo es un ácido débil. Dependiendo del pH de la solución circundante, un aminoácido libre puede ser neutro, estar cargado negativamente (si el grupo $-\text{COOH}$ se ioniza a $-\text{COO}^-$ y H^+) o positivamente (si el grupo $-\text{NH}_2$ ha adquirido un ion hidrógeno, transformándose en $-\text{NH}_3^+$).

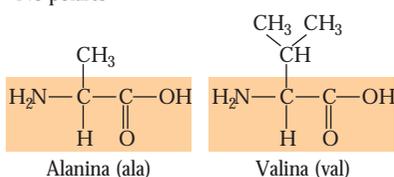
En teoría es posible la existencia de una gran variedad de aminoácidos distintos, pero solamente veinte tipos diferentes se utilizan para construir las proteínas (fig. 3-18 b), y siempre los mismos veinte, ya se trate de una célula bacteriana, de una célula vegetal o de una célula de nuestro propio organismo. Las únicas dife-



(a)

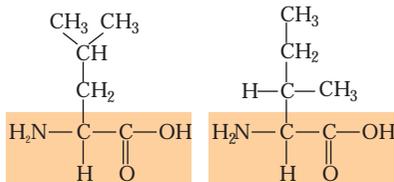
Fig. 3-18. a) Cada aminoácido contiene un grupo amino ($-\text{NH}_2$) y un grupo carboxilo ($-\text{COOH}$) unidos a un átomo de carbono central. Un átomo de hidrógeno y un grupo lateral están también unidos al mismo átomo de carbono. Esta estructura básica es idéntica en todos los aminoácidos. La "R" indica el grupo lateral, que es diferente en cada tipo de aminoácido. **b)** Los veinte aminoácidos que pueden constituir las proteínas. Como puede verse, la estructura esencial es la misma en las veinte moléculas, pero los grupos laterales difieren. Estos grupos pueden ser no polares (sin diferencia de carga entre distintas zonas del grupo), polares pero con cargas balanceadas de modo tal que el grupo lateral en conjunto es neutro, o cargados negativa o positivamente. Los grupos laterales no polares no son solubles en agua, mientras que los grupos laterales polares y cargados son solubles en agua.

No polares



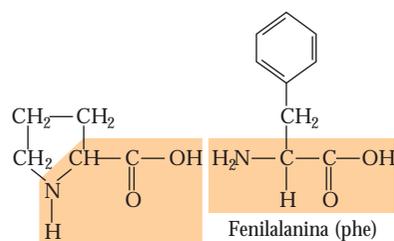
Alanina (ala)

Valina (val)



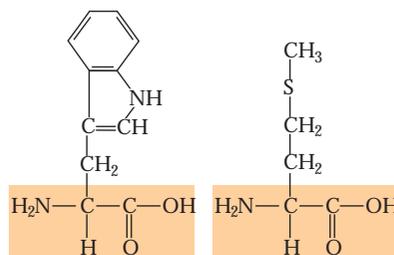
Leucina (leu)

Isoleucina (ile)



Prolina (pro)

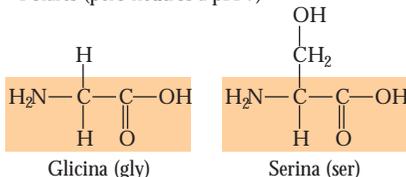
Fenilalanina (phe)



Triptófano (trp)

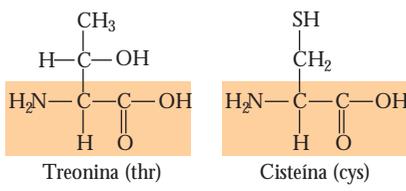
Metionina (met)

Polares (pero neutros a pH 7)



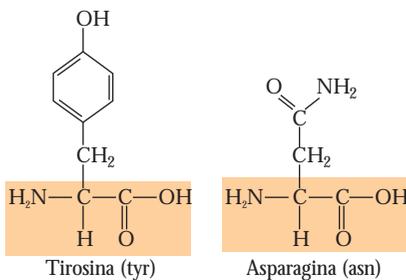
Glicina (gly)

Serina (ser)



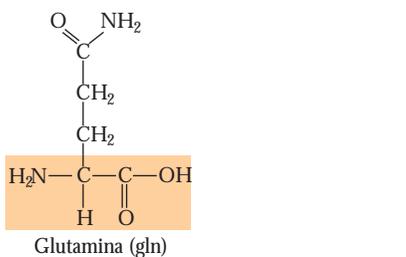
Treonina (thr)

Cisteína (cys)



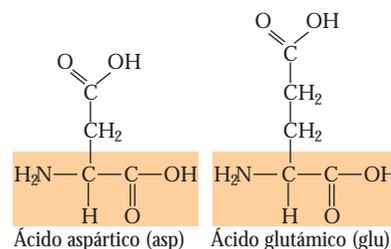
Tirosina (tyr)

Asparagina (asn)



Glutamina (gln)

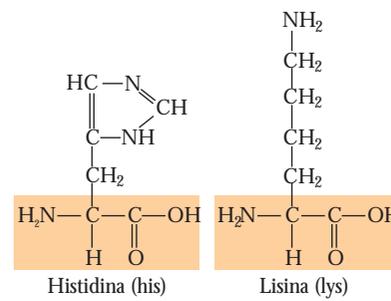
Ácidos (cargados negativamente a pH 7)



Ácido aspártico (asp)

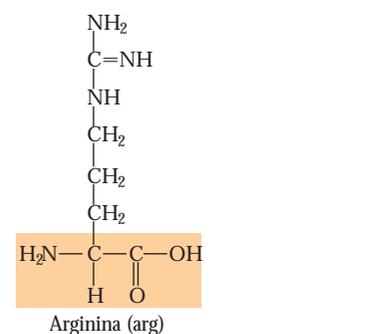
Ácido glutámico (glu)

Básicos (cargados positivamente a pH 7)



Histidina (his)

Lisina (lys)



Arginina (arg)

(b)

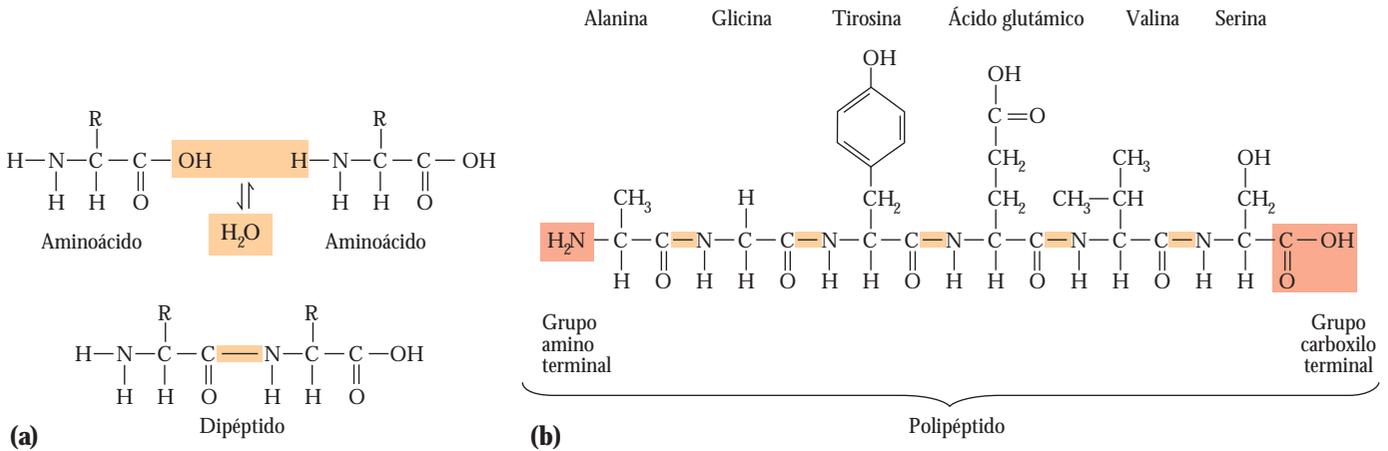


Fig. 3-19. a) Un enlace peptídico es un enlace covalente formado por una reacción de condensación. **b)** Los polipéptidos son polímeros de aminoácidos unidos por enlaces peptídicos, en los que el grupo amino de un aminoácido se une al grupo carboxilo de su vecino. La cadena polipeptídica que se muestra contiene solamente seis aminoácidos, pero algunas cadenas pueden contener hasta 1.000 monómeros de aminoácidos.

rencias entre estos veinte aminoácidos radican en sus grupos laterales (R). En ocho de las moléculas, el grupo lateral está formado por cadenas cortas o por anillos de carbono e hidrógeno; como podemos imaginar, dichos grupos son no polares y por lo tanto son hidrofóbicos. Los grupos laterales de siete de los aminoácidos restantes tienen cadenas laterales que son ácidos débiles o bases débiles; dependiendo del grupo lateral en particular y del pH de la solución, pueden estar negativa o positivamente cargados.

En otro ejemplo de una reacción de condensación, la “cabeza” amino de un aminoácido se puede unir a la “cola” carboxilo de otro, por la eliminación de una molécula de agua (fig. 3-19 a). La unión covalente que se forma se conoce como **enlace peptídico** y la molécula que surge de la unión de muchos aminoácidos se llama **polipéptido** (fig. 3-19 b). La secuencia de aminoácidos en la cadena polipeptídica determina el carácter biológico de la molécula proteica; aun una pequeña variación en la secuencia puede alterar o destruir la manera de funcionar de la proteína. Volveremos sobre esto en la Sección 3.

Para ensamblar los aminoácidos en proteínas, una célula no sólo debe tener una cantidad bastante grande de aminoácidos, sino también suficiente cantidad de cada tipo. Este hecho es de gran importancia en la nutrición humana (véase el ensayo: *Los aminoácidos y el nitrógeno*).

Los niveles de organización de las proteínas

En un sistema vivo, una proteína se ensambla de a un aminoácido por vez formándose una larga cadena polipeptídica. En este proceso (que será descrito con mayor detalle en el capítulo 14), el grupo amino de un aminoácido está unido al grupo carbonilo* de otro a la manera de una hilera de vagones. La secuencia lineal de aminoácidos, dictada por la información hereditaria contenida en la célula para esa proteína en particular, se conoce como **estructura primaria** de la proteína. Cada proteína diferente tiene una estructura primaria diferente. La estructura primaria de una proteína se muestra en la figura 3-20.

A medida que la cadena se ensambla, comienzan a ocurrir interacciones entre los distintos aminoácidos de la proteína. Linus Pauling y su colaborador Robert Corey descubrieron que podían formarse puentes de hidrógeno entre el hidrógeno ligeramente positivo del grupo amino de un aminoácido y el oxígeno ligeramente

* Cuando se forma un enlace peptídico, el OH⁻ del grupo carboxilo y un H⁺ del grupo amino se escinden para formar una molécula de agua. Lo que queda del grupo carboxilo es el grupo C = O, al que en este contexto denominamos grupo “carbonilo” (véase cuadro 3-1).

Los aminoácidos y el nitrógeno

Al igual que las grasas, los aminoácidos se forman dentro de las células vivas utilizando azúcares como materias primas. Pero mientras que las grasas están constituidas solamente por átomos de carbono, hidrógeno y oxígeno, todos ellos disponibles en el azúcar y el agua de la célula, los aminoácidos contienen también nitrógeno. La mayor parte de la reserva de nitrógeno en la Tierra existe en la atmósfera en forma de gas. Solamente unos pocos organismos, todos microscópicos, son capaces de incorporar nitrógeno del aire en compuestos (como amoníaco, nitritos y nitratos) que pueden ser utilizados por los sistemas vivos. Por consiguiente, la proporción de la reserva de nitrógeno de la Tierra que está a disposición del mundo vivo es muy pequeña.

Las plantas incorporan el nitrógeno del amoníaco y de los nitratos y lo fijan en compuestos hidrocarbonados para formar los aminoácidos. Los animales son capaces de sintetizar parte de sus aminoácidos utilizando amoníaco como fuente de nitrógeno. Los aminoácidos que no pueden sintetizar –los llamados aminoácidos esenciales– deben obtenerse, directa o indirectamente, de las plantas. Para los seres humanos adultos, los aminoácidos esenciales son: lisina, triptófano, treonina, metionina, fenilalanina, leucina, valina e isoleucina.

Las personas que comen carne, obtienen habitualmente suficientes proteínas y el balance correcto de aminoáci-

dos. Los que son vegetarianos, ya sea por razones filosóficas, estéticas o económicas, deben preocuparse por obtener suficientes proteínas y, en particular, los aminoácidos esenciales.

Hasta hace poco, los científicos agrícolas preocupados por las poblaciones hambrientas, concentraban sus esfuerzos en desarrollar plantas con alto rendimiento en calorías. Un reconocimiento creciente del papel de las plantas como fuente principal de aminoácidos para las poblaciones humanas ha inducido a poner énfasis en el desarrollo de variedades de plantas con alto contenido en proteínas, como la soja, y de plantas con aminoácidos esenciales, como el maíz rico en lisina.

Otra solución para lograr un balance correcto de aminoácidos consiste en combinar ciertos alimentos. Los frijoles o porotos, por ejemplo, probablemente sean deficientes en triptófano y en los aminoácidos que contienen azufre, pero son una fuente excelente de isoleucina y lisina. El arroz es deficiente en isoleucina y lisina, pero suministra una cantidad adecuada de los demás aminoácidos esenciales. Así, la combinación de arroz y frijoles constituye un menú de proteínas casi tan perfecto como los huevos o una porción de carne, lo que al parecer sabían desde hace muchísimo tiempo algunos pueblos, a pesar de no ser científicos.

mente negativo del carbonilo de otro aminoácido. Ellos dilucidaron dos estructuras que podrían ser resultado de estos puentes de hidrógeno. Una de éstas fue llamada *hélice alfa*, porque fue la primera en ser descubierta, y la segunda, *hoja o lámina plegada beta*. Estas estructuras se muestran en la figura 3-21. Los bioquímicos denominan **estructura secundaria** de una proteína a las configuraciones regulares repetidas que generan los puentes de hidrógeno entre los átomos del esqueleto polipeptídico. Las proteínas que en la mayor parte de su longitud asumen una forma de hélice alfa o de hoja plegada se conocen como *proteínas fibrosas* y desempeñan importantes papeles estructurales en los organismos. Una misma proteína puede adoptar en una región la forma hélice y en otra, la forma de hoja plegada (fig. 3-21 c). El plegamiento correcto de las proteínas es fundamental para su buen funcionamiento. Los cambios en la manera de plegarse de algunas de ellas pueden conducir al desarrollo de enfermedades, como ocurre en las *encefalopatías espongiiformes transmisibles*. Entre ellas, sin duda, la más conocida es la llamada enfermedad de las vacas locas, una dolencia mortal que afecta específicamente a células del cerebro del hombre y otros mamíferos. Los causantes de esta enfermedad se denominan **priones**, y son proteínas normalmente presentes en las membranas de células del sistema nervioso que, en determinado momento y espontáneamen-

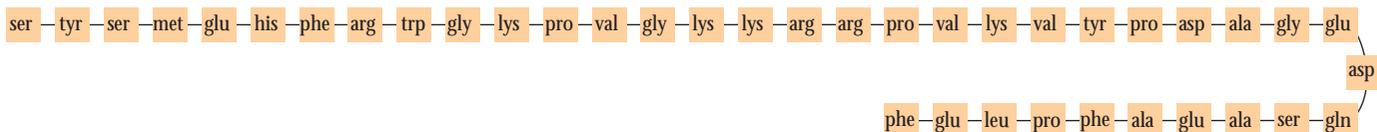


Fig. 3-20. Estructura primaria de una proteína relativamente pequeña, la hormona humana adrenocorticotrofina (ACTH). Esta fue una de las primeras proteínas para las cuales se determinó la estructura primaria. Como puede verse, está formada por una sola cadena polipeptídica que contiene 39 aminoácidos. Esta hormona secretada por la glándula hipófisis, estimula la producción, por la corteza suprarrenal, de cortisol y de hormonas esteroideas relacionadas con éste.

te, adquieren un nuevo plegamiento. La proteína normal tiene más hélices alfa que estructuras beta, mientras que en la forma patológica la estructura de hoja plegada es la que predomina. Las proteínas que adoptan la nueva configuración se vuelven infectivas y son capaces de catalizar el cambio de plegamiento de otras proteínas. Como resultado, la proporción de proteínas anormalmente plegadas aumenta y la enfermedad avanza. Volveremos sobre este tema en el capítulo 27. Otras fuerzas, relacionadas con la naturaleza de los grupos R de los aminoácidos individuales, también actúan sobre la cadena polipeptídica y contrarrestan la formación de los puentes de hidrógeno recién descritos. Por ejemplo, un grupo R como el de la isoleucina es tan voluminoso que interrumpe el giro de la hélice, haciendo imposible la formación de puentes de hidrógeno. Cuando la porción -SH del grupo R de una cisteína se encuentra con la misma porción de otra cisteína, pueden escindir-se dos átomos de hidrógeno, formándose como resultado un enlace covalente entre los átomos de azufre de los dos aminoácidos. Este enlace, conocido como puente disulfuro, inmoviliza a la molécula en dicha posición. Los grupos R con cargas diferentes se atraen y aquellos con carga semejan-

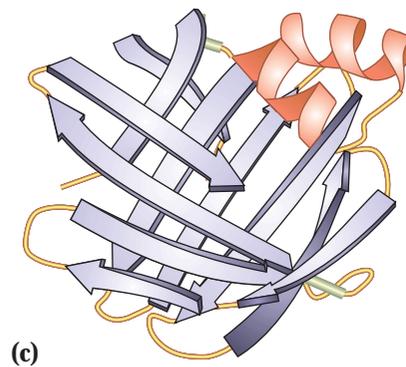
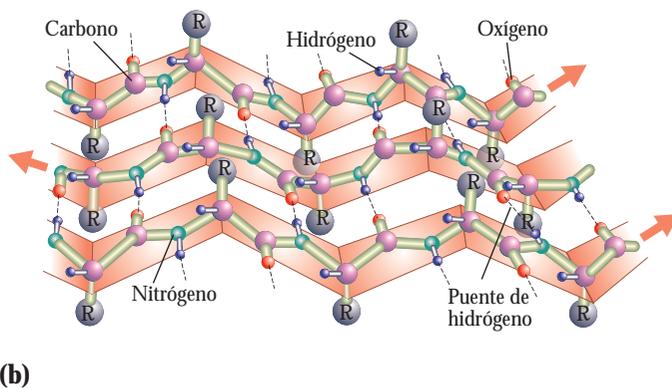
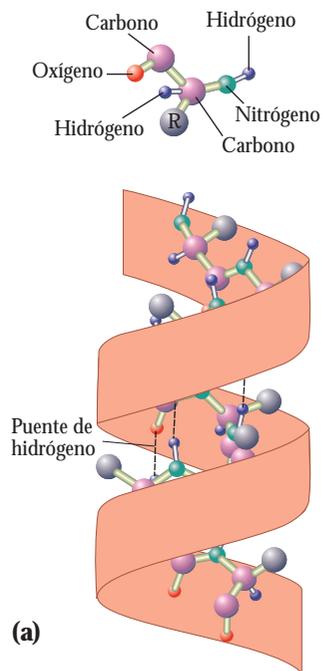


Fig. 3-21. Estructuras secundarias de las proteínas. **a)** La hélice alfa. Esta hélice mantiene su forma por la presencia de los puentes de hidrógeno, indicados por las líneas de puntos. En este caso, los puentes de hidrógeno se forman entre los átomos de oxígeno del grupo carbonilo de un aminoácido y el átomo de hidrógeno del grupo amino de otro aminoácido situado a cuatro aminoácidos de distancia en la cadena. Los grupos R, que se muestran en este diagrama, están unidos a los carbonos indicados por las esferas color lila. Los grupos R se extienden hacia afuera desde la hélice. **b)** La hoja plegada beta. Los pliegues se forman por la existencia de puentes de hidrógeno entre distintos átomos del esqueleto del polipeptido; los grupos R, unidos a los carbonos indicados por las esferas color lila, se extienden por encima y por debajo de los pliegues de la hoja. **c)** Diagrama de una proteína (enzima) cuya estructura secundaria incluye hojas beta plegadas (azul) y alfa hélices (rosa).

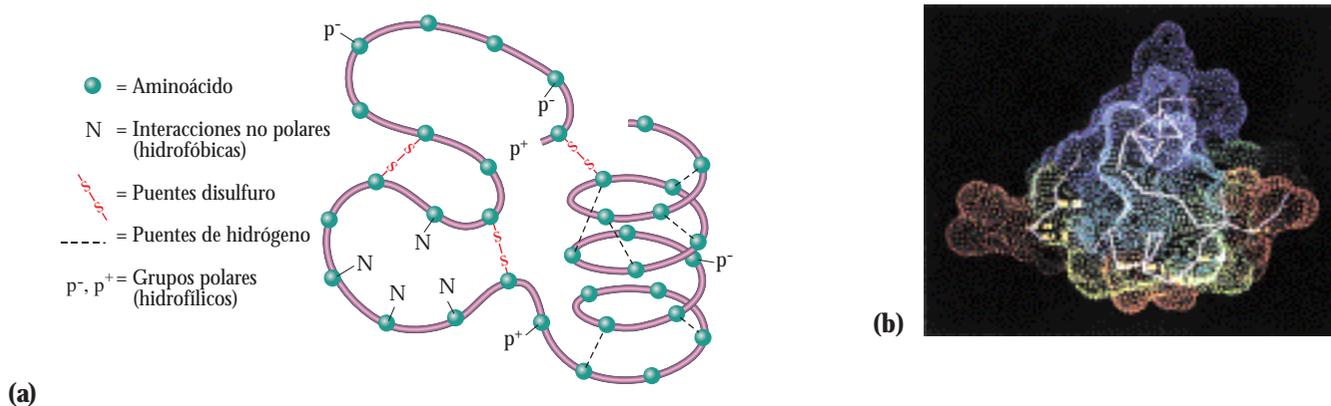


Fig. 3-22. a) Tipos de enlaces que estabilizan la estructura terciaria de una molécula de proteína. Estos mismos tipos de enlace también estabilizan la estructura de las moléculas de proteínas formadas por más de una cadena polipeptídica. b) Un modelo generado por computadora de la molécula de insulina que está formada por dos cadenas polipeptídicas cortas, plegadas en una estructura tridimensional intrincada. Las dos líneas representan los esqueletos de las cadenas y los puntos representan los átomos de la superficie de la molécula accesibles al solvente circundante. En la molécula de insulina como en todas las moléculas, los átomos están vibrando y rotando constantemente. Los átomos que se muestran en rojo y en naranja son los más proclives a sufrir ligeros desplazamientos de posición en el cristal de insulina, mientras que los que se muestran en violeta y celeste es menos probable que se desplacen de su posición.

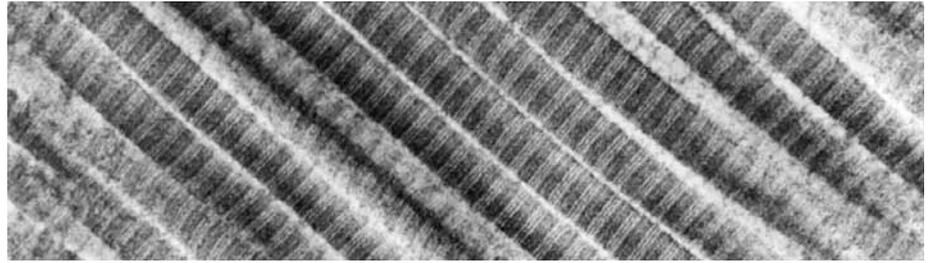
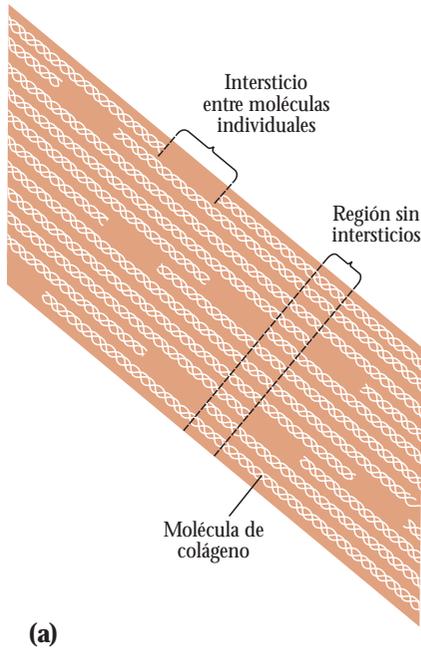
te se rechazan. A medida que la molécula se tuerce y entra en solución, los grupos R hidrofóbicos tienden a agruparse en el interior de la molécula y los grupos R hidrofílicos tienden a extenderse hacia afuera en la solución acuosa. Se forman puentes de hidrógeno que enlazan segmentos del esqueleto de aminoácidos. La estructura tridimensional intrincada que resulta de estas interacciones entre los grupos R es denominada **estructura terciaria** de una proteína. La figura 3-22 a muestra los distintos tipos de enlace involucrados en la formación de la estructura terciaria.

En muchas proteínas, la estructura terciaria hace que toda la molécula adquiera una configuración globular, que se pliega de manera complicada; estas proteínas se llaman *globulares*. Las enzimas (proteínas que regulan las reacciones químicas en los sistemas vivos) son proteínas globulares, al igual que lo son los receptores de membrana para una enorme variedad de moléculas. Los anticuerpos, componentes importantes del sistema inmune, también son proteínas globulares. Como veremos en capítulos ulteriores, las estructuras tridimensionales de las proteínas son de importancia crítica en la determinación de sus funciones biológicas.

Muchas proteínas están compuestas de más de una cadena polipeptídica. Estas cadenas pueden permanecer asociadas por puentes de hidrógeno, puentes disulfuro, fuerzas hidrofóbicas, atracciones entre cargas positivas y negativas o, más frecuentemente, por una combinación de estos tipos de interacción. Estas proteínas a menudo se llaman multiméricas: una proteína que contiene dos cadenas polipeptídicas se llama dímero; una que contiene tres cadenas, trímero; y la que contiene cuatro, tetrámero. La hormona insulina, por ejemplo, es un dímero; está compuesta de dos cadenas polipeptídicas (fig. 3-22 b). Este nivel de organización de las proteínas, que implica la interacción de dos o más polipéptidos, se llama **estructura cuaternaria**.

Las estructuras secundaria, terciaria y cuaternaria de una proteína dependen de la secuencia de aminoácidos (estructura primaria) y del ambiente químico local.

Estudios recientes mostraron que el plegamiento de las proteínas y el ensamblado de las subunidades de las proteínas multiméricas no son procesos completamente espontáneos sino que son facilitados por un grupo de otras proteínas llamadas **chaperones moleculares**. Las proteínas chaperones se unen en forma transitoria a polipéptidos nacientes y a proteínas desplegadas o desensambladas y así ejercen su acción. La existencia de los chaperones moleculares no contradice la afirmación de que la secuencia de aminoácidos determina la conformación de las proteínas ya que toda proteína, si cuenta con el tiempo suficiente, se plegará de manera de adoptar la conformación de mínima energía. Sin embargo, en el ambiente celular, atestado de productos orgánicos, las proteínas podrían llegar a plegamientos incorrectos. La presencia de chaperones, en general, evita estos errores.



(b)

Fig. 3-23. Las moléculas de colágeno están empaquetadas en fibrillas. Son el constituyente principal de la piel, los tendones, los ligamentos, los cartílagos y los huesos. En una fibrilla individual (a), las moléculas de colágeno se disponen en un patrón discontinuo, con espacios entre las moléculas individuales. Esta disposición refuerza las fibrillas, haciéndolas resistentes a las fuerzas deformantes. En las microfotografías electrónicas de las fibrillas de colágeno, como en (b), se observa un patrón estriado, a raíz de que el colorante usado al preparar las muestras se concentró en los intersticios de las moléculas, haciendo que las regiones que no poseen intersticios aparezcan como bandas más claras. Estas fibrillas están aumentadas 23.500 veces.

Funciones estructurales de las proteínas

Proteínas fibrosas

En general, las proteínas fibrosas tienen una secuencia repetida de aminoácidos y, por lo tanto, una estructura redundante, regular. Un ejemplo es el colágeno, que constituye aproximadamente un tercio de toda la proteína de los vertebrados. La molécula básica de colágeno está compuesta de tres polipéptidos muy largos (alrededor de mil aminoácidos por cadena). Estos tres polipéptidos, constituidos por grupos repetidos de aminoácidos, se mantienen unidos por puentes de hidrógeno que enlazan a los aminoácidos de diferentes cadenas formando una espiral cerrada. Las moléculas pueden enroscarse tan cerradamente porque cada tres aminoácidos se encuentra una glicina, que es el más pequeño de todos. Las moléculas de colágeno se empaquetan y forman fibrillas (fig. 3-23), que a su vez se asocian en fibras de mayor tamaño.

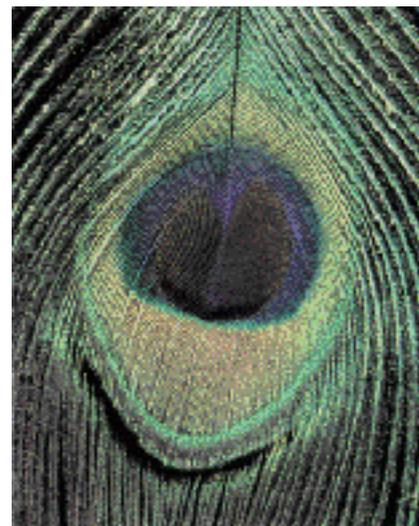
El colágeno constituye en realidad una familia de proteínas. Diferentes tipos de moléculas de colágeno contienen polipéptidos con secuencias ligeramente diferentes de aminoácidos. Las estructuras más grandes, formadas a partir de los diferentes tipos de moléculas, desempeñan una variedad de funciones en el cuerpo. Consideremos una vaca: los tendones, que unen el músculo al hueso, están constituidos de fibras de colágeno en haces paralelos; así dispuestos son muy fuertes, pero no se estiran. En contraste, el cuero de la vaca está constituido por fibrillas de colágeno dispuestas en una malla entrelazada que se deposita en láminas. Incluso sus córneas (las cubiertas transparentes de los globos oculares) están compuestas de colágeno. Cuando el colágeno se hierve en agua, los polímeros se dispersan en cadenas más cortas, que conocemos como gelatina.

Otras proteínas fibrosas incluyen a la queratina (fig. 3-24), la seda y la elastina, esta última presente en el tejido elástico de los ligamentos.

Fig. 3-24. La proteína fibrosa queratina se encuentra en todos los vertebrados. Es el componente principal de las escamas, la lana, las uñas y las plumas. a) El cuerno de un rinoceronte está formado por fibras de queratina fuertemente empaquetadas. El cuerno sólido del rinoceronte se usa para empuñaduras de cuchillos y el cuerno pulverizado, como afrodisíaco. Un solo cuerno puede producirle a un cazador furtivo una ganancia neta superior al sueldo anual promedio percibido en muchas partes de África lo fue, lamentablemente, estimula la caza de este animal. b) Una pluma, como ésta de un pavo real que muestra un colorido espectacular, también está formada por queratina.



(a)



(b)

Proteínas globulares

Como vimos, algunas proteínas estructurales son globulares. Por ejemplo, los microtúbulos, que funcionan de diversas maneras dentro de la célula, están constituidos por proteínas globulares. Estas proteínas se asocian para formar tubos largos y huecos, tan largos que su longitud total pocas veces puede observarse en un solo corte microscópico. Los microtúbulos desempeñan un papel crítico en la división celular, como veremos en el capítulo 10. También participan en el esqueleto interno, que da rigidez a ciertas partes del cuerpo celular, y además parecen funcionar a modo de andamios durante el trabajo de construcción celular. Por ejemplo, la formación de una nueva pared celular en una planta puede predecirse por la aparición en esa zona de un gran número de microtúbulos; cuando la pared de una célula vegetal se está formando o creciendo, y en el exterior de la membrana celular se están depositando fibrillas de celulosa, dentro de la célula pueden detectarse microtúbulos, alineados en la misma dirección que las fibrillas exteriores. En el capítulo 5 volveremos sobre la estructura y función de los microtúbulos.

Hemoglobina: ejemplo de especificidad

Las proteínas fibrosas, a semejanza de los polisacáridos, son usualmente moléculas con una variedad relativamente pequeña de monómeros en una secuencia repetida. Muchas proteínas globulares, por contraste, tienen secuencias irregulares y extremadamente complejas de aminoácidos, así como es compleja e irregular la secuencia de letras en una frase de esta página. De igual modo que estas frases tienen sentido (si es que lo tienen), porque las letras son las correctas y están en el orden correcto, las proteínas tienen sentido, biológicamente hablando, porque sus aminoácidos son los correctos y se disponen en el orden correcto.

La hemoglobina, por ejemplo, es una proteína elaborada y transportada por los glóbulos rojos. Sus moléculas tienen la propiedad especial de ser capaces de combinarse débilmente con el oxígeno, recogiénolo en los pulmones y liberándolo en los tejidos. La molécula de hemoglobina tiene una estructura cuaternaria for-

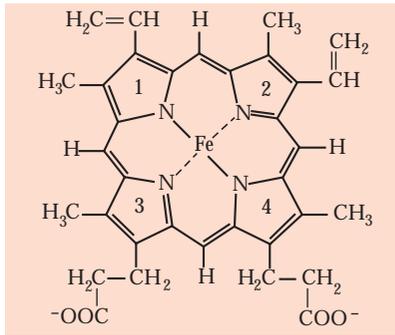


Fig. 3-25. El grupo hemo de la hemoglobina. Contiene un átomo de hierro (Fe) sostenido en un anillo de porfirina. El anillo de porfirina está formado, a su vez, por cuatro anillos que contienen nitrógeno, numerados en el diagrama. Cada grupo hemo está unido a una larga cadena polipeptídica, que se enrolla alrededor de él. La molécula de oxígeno se mantiene aplanada contra el hemo.

mada por cuatro cadenas polipeptídicas, cada una de las cuales se combina con un grupo que contiene hierro, conocido como **hemo**. En el hemo, un átomo de hierro está sostenido por átomos de nitrógeno, que forman parte de una estructura más grande conocida como anillo de porfirina (fig. 3-25). La hemoglobina tiene dos cadenas alfa idénticas y dos cadenas beta idénticas, cada una con una estructura primaria única que contiene unos 150 aminoácidos, lo que hace un total de 600 aminoácidos (fig. 3-26).

La anemia falciforme es una enfermedad en la cual las moléculas de hemoglobina son defectuosas. Estas moléculas cambian de configuración y se combinan entre sí, formando estructuras rígidas bastoniformes, cuando se les elimina el oxígeno. Los glóbulos rojos, cuando contienen grandes proporciones de esas moléculas defectuosas de hemoglobina, se vuelven rígidos y se deforman, adoptando la forma característica de una hoz (fig. 3-27). Las células deformadas pueden taponar los vasos sanguíneos más pequeños (capilares). Esto causa la formación de coágulos y priva a los órganos vitales del suministro normal de sangre, dando como resultado dolor, malestares intermitentes y, en muchos casos, un acortamiento del lapso de vida. Volveremos sobre este tema en el capítulo 19.

El análisis de las moléculas de hemoglobina revela que la única diferencia entre la hemoglobina normal y la hemoglobina falciforme es que, en un sitio preciso de cada cadena beta, un ácido glutámico es reemplazado por una valina. En la estructura cuaternaria de la molécula, este sitio particular está sobre la superficie exterior, y la valina, a diferencia del ácido glutámico, contiene un grupo R no polar. El resultado es una región hidrofóbica, "pegajosa", que puede actuar con las regiones hidrofóbicas de moléculas de hemoglobina vecinas, produciendo el aglutinamiento observado (fig. 3-28). Cuando se piensa en que esta diferencia de dos aminoácidos en un total de casi 600 puede causar una diferencia tan profunda en las propiedades del conjunto de la molécula (en verdad, puede ser la diferencia entre la vida y la muerte), se comienza a tener una idea de la precisión e impor-

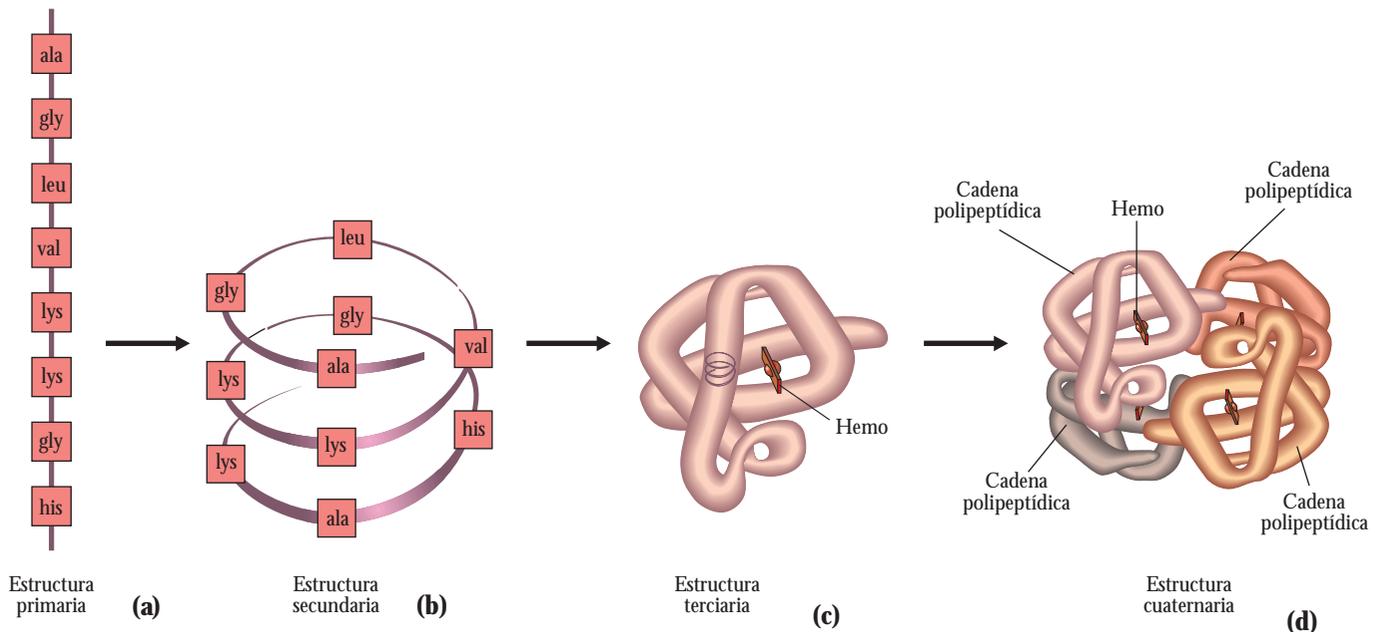


Fig. 3-26. Los niveles de organización de la molécula de hemoglobina. **a)** La secuencia de los aminoácidos en cada cadena es su estructura primaria. **b)** La forma helicoidal adoptada por cualquier parte de la cadena, como consecuencia del enlace de hidrógeno entre los grupos $C=O$ y $-NH$, es su estructura secundaria. **c)** El plegamiento de las cadenas en figuras tridimensionales es la estructura terciaria. **d)** La combinación de las cuatro cadenas de una sola molécula funcional es la estructura cuaternaria. El exterior de la molécula y el agujero en la parte central están tapizados de aminoácidos cargados, y los aminoácidos sin carga están empaquetados en el interior. Cada una de las cuatro cadenas circunda a un grupo hemo (rojo), que puede retener a una sola molécula de oxígeno. Una molécula de hemoglobina, por lo tanto, es capaz de transportar cuatro moléculas de oxígeno.

Fig. 3-27. Microfotografías electrónicas de barrido de **a)** un glóbulo rojo que contiene hemoglobina normal, y **b)** un glóbulo rojo que contiene la hemoglobina anormal asociada con la anemia falciforme. Cuando la concentración de oxígeno en la sangre es baja, las moléculas de hemoglobina anormal se pegan, distorsionando la forma de las células. Como resultado, las células no pueden pasar fácilmente a través de los capilares. Las células están aumentadas aproximadamente 7.000 veces.



(a)



(b)

tancia de la distribución de los aminoácidos en una secuencia particular de una proteína. En los sistemas vivos, que deben desempeñar muchas actividades diferentes de manera simultánea, es de importancia crucial la especificidad de la función que resulta de la precisión estructural de diferentes moléculas de proteína.

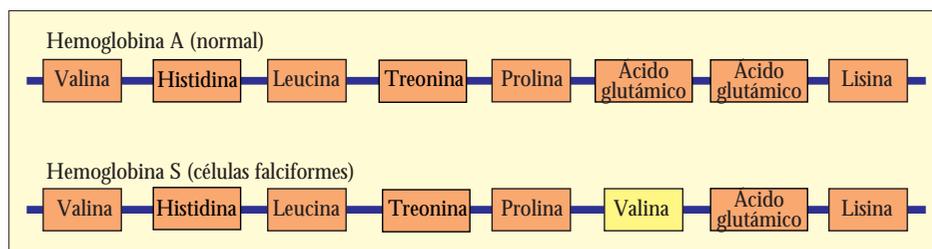
NUCLEÓTIDOS Y ÁCIDOS NUCLEICOS

La información que dicta las estructuras de la enorme variedad de moléculas de proteínas que se encuentran en los organismos está codificada en moléculas conocidas como **ácidos nucleicos**, y es traducida por éstas. Así como las proteínas están formadas por cadenas largas de aminoácidos, los ácidos nucleicos están formados por cadenas largas de nucleótidos. Un nucleótido, sin embargo, es una molécula más compleja que un aminoácido. Como se ve en la figura 3-29, está formado por tres subunidades: un grupo fosfato, un azúcar de cinco carbonos y una **base nitrogenada**; esta última, como lo indica su nombre, tiene las propiedades de una base y contiene nitrógeno.

La subunidad azúcar de un nucleótido puede ser ribosa o desoxirribosa, que contiene un átomo de oxígeno menos que la ribosa (fig. 3-30). La ribosa es el azúcar en los nucleótidos que forman **ácido ribonucleico (RNA)** y la desoxirribosa es el azúcar en los nucleótidos que forman **ácido desoxirribonucleico (DNA)**. Hay cinco bases nitrogenadas diferentes en los nucleótidos, que son los sillares de construcción de los ácidos nucleicos. Dos de ellas, la adenina y la guanina, tienen una estructura de dos anillos y se conocen como **purinas** (fig. 3-31 a). Las otras tres, citosina, timina y uracilo, tienen una estructura de anillo único y se conocen como **pirimidinas** (fig. 3-31 b). La adenina, la guanina y la citosina se encuentran tanto en el DNA como en el RNA, mientras que la timina se encuentra sólo en el DNA y el uracilo sólo en el RNA.

Aunque sus componentes químicos son muy semejantes, el DNA y el RNA desempeñan papeles biológicos muy diferentes. El DNA es el constituyente primario de los cromosomas de las células y es el portador del mensaje genético. La

Fig. 3-28. Un ejemplo de la notable precisión del "lenguaje" de las proteínas. Porciones de las cadenas beta de la molécula de hemoglobina A (normal) y de la molécula de la hemoglobina S (células falciformes). Toda la diferencia estructural entre la molécula normal y la molécula falciforme (literalmente una diferencia entre la vida y la muerte) consiste en un cambio en la secuencia de cada cadena beta: un ácido glutámico está reemplazado por una valina.



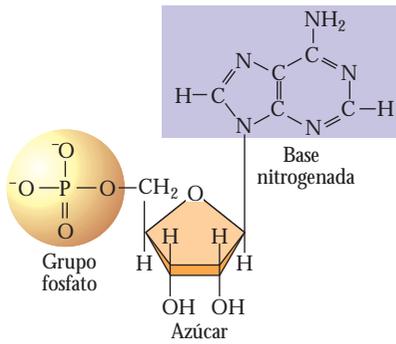
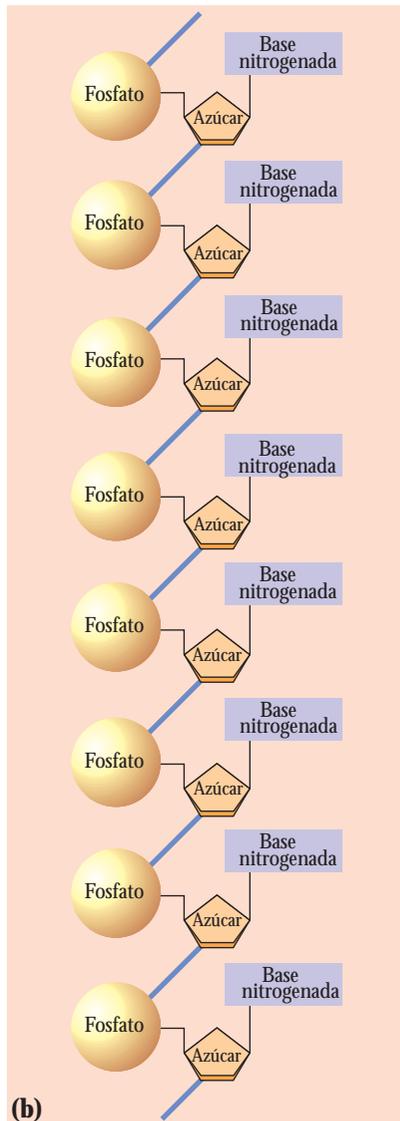


Fig. 3-29. Un nucleótido está constituido por tres subunidades diferentes: un grupo fosfato, un azúcar de cinco carbonos y una base nitrogenada, en este caso, adenina. El nucleótido que se muestra en esta figura es el AMP.

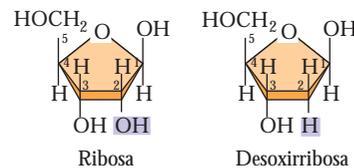


función del RNA es transcribir el mensaje genético presente en el DNA y traducirlo a proteínas. El descubrimiento de la estructura y función de estas moléculas es hasta ahora, indudablemente, el mayor triunfo del enfoque molecular en el estudio de la biología.

Los nucleótidos, además de su papel en la formación de los ácidos nucleicos, tienen una función independiente y vital para la vida celular. Cuando un nucleótido se modifica por la unión de dos grupos fosfato, se convierte en un transportador de energía, necesario para que se produzcan numerosas reacciones químicas celulares. La energía contenida en los glúcidos de reserva, como el almidón y el glucógeno, y en los lípidos sería como el dinero depositado a plazo fijo; no es asequible fácilmente. La energía de la glucosa es como el dinero en una cuenta corriente, accesible, pero no tanto como para realizar todas las operaciones cotidianas. La energía en los nucleótidos modificados, en cambio, es como el dinero de bolsillo, disponible en cantidades convenientes y aceptado en forma generalizada.

El principal portador de energía, en casi todos los procesos biológicos, es una molécula llamada **trifosfato de adenosina** o ATP. Esta molécula está representada esquemáticamente en la figura 3-32 y se verá con mayor detalle en el capítulo 7. En ella se pueden observar los tres grupos fosfato. Los enlaces que unen estos tres grupos son relativamente débiles y pueden romperse con cierta facilidad por hidrólisis. Los productos de la reacción más común, como se ve en la figura 3-33 son el ADP –difosfato de adenosina–, un grupo fosfato y energía. Esta energía, al desprenderse, puede ser utilizada para producir otras reacciones químicas.

En el capítulo 4 de esta sección, discutiremos las explicaciones acerca de cómo el DNA, el RNA y las proteínas pudieron haber surgido y cómo se pudieron haber vinculado entre sí. En la Sección 2, volveremos sobre el papel que juega el ATP en las reacciones químicas de los sistemas vivos. En la Sección 3 describiremos los hechos que llevaron a los descubrimientos centrales y consideraremos con cierto detalle los procesos maravillosos (cuyos detalles todavía están siendo dilucidados) mediante los cuales estas moléculas desempeñan sus funciones. Primero, sin embargo, debemos fijar nuestra atención en la célula viva, sus orígenes, su estructura y las actividades por las que se mantiene como una entidad distinta del mundo no vivo que la rodea.



(a)

Fig. 3-30. a) La subunidad de azúcar de un nucleótido puede ser ribosa o bien desoxirribosa. Como puede verse, la diferencia estructural entre los dos azúcares es leve. En la ribosa, el carbono 2 lleva un átomo de hidrógeno por encima del plano del anillo y un grupo hidroxilo por debajo del plano; en la desoxirribosa, el grupo hidroxilo del carbono 2 está reemplazado por un átomo de hidrógeno. b) Los nucleótidos pueden unirse en cadenas largas por reacciones de condensación que involucran a los grupos hidroxilo de las subunidades de fosfato y de azúcar. En la figura se muestra una molécula de RNA que, como se observa, está formada por una sola cadena de nucleótidos. Como veremos en el capítulo 14, las moléculas de DNA, en cambio, constan de dos cadenas de nucleótidos enrolladas sobre sí mismas que forman una doble hélice.

Fig. 3-31. Las cinco bases nitrogenadas de los nucleótidos que constituyen los ácidos nucleicos. **a)** La adenina y la guanina (purinas) aparecen tanto en el DNA como en el RNA, al igual que la citosina, una de las pirimidinas. **b)** La timina, también una pirimidina, se encuentra en el DNA, pero no en el RNA, y el uracilo, una tercera pirimidina, se encuentra en el RNA, pero no en el DNA. Como veremos en la Sección 3, la secuencia de estas moléculas simples en las cadenas largas de los ácidos nucleicos es la responsable de la transmisión y la traducción de la información hereditaria generación tras generación.

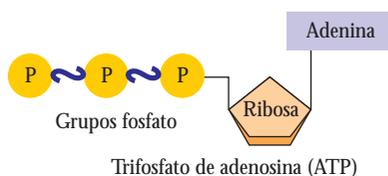
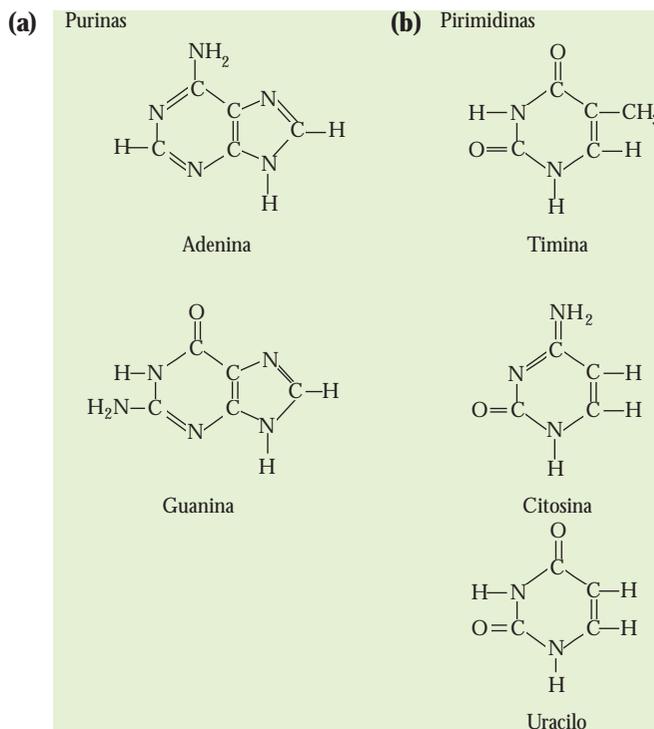


Fig. 3-32. Esquema de una molécula de ATP (trifosfato de adenosina). La única diferencia entre esta molécula y el AMP (monofosfato de adenosina) que se muestra en la figura 3-29, es la unión de dos grupos fosfato adicionales. Aunque esta diferencia en la fórmula puede parecer pequeña, es la clave del funcionamiento del ATP en los seres vivos.

RESUMEN

La química de los organismos vivos es, en esencia, la química de los compuestos orgánicos, o sea, de los compuestos que contienen carbono. El carbono es singularmente adecuado para este papel central, por el hecho de que es el átomo más liviano capaz de formar múltiples enlaces covalentes. A raíz de esta capacidad, el carbono puede combinarse con otros átomos de carbono y con átomos distintos para formar una gran variedad de cadenas fuertes y estables y de compuestos con forma de anillo. Las moléculas orgánicas derivan sus configuraciones tridimensionales primordialmente de sus esqueletos de carbono. Sin embargo, muchas de sus propiedades específicas dependen de grupos funcionales. Una característica general de todos los compuestos orgánicos es que liberan energía cuando se oxidan. Entre los tipos principales de moléculas orgánicas importantes en los sistemas vivos están los carbohidratos, los lípidos, las proteínas y los nucleótidos.

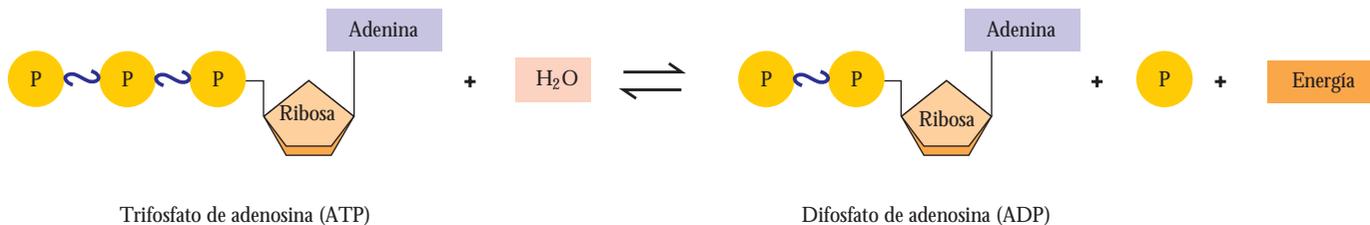


Fig. 3-33. La hidrólisis del ATP. Con la adición de una molécula de agua al ATP, un grupo fosfato se separa de la molécula. Los productos de la reacción son el ADP, un grupo fosfato libre y energía. Alrededor de unas 7 kilocalorías de energía se liberan por cada mol de ATP hidrolizado. La reacción puede ocurrir en sentido contrario si se aportan las 7 kilocalorías por mol necesarias.

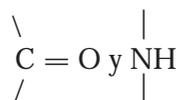
Los carbohidratos son la fuente primaria de energía química para los sistemas vivos. Los carbohidratos más simples son los monosacáridos (“azúcares simples”), como la glucosa y la fructosa. Los monosacáridos pueden combinarse para formar disacáridos (“dos azúcares”), como la sacarosa, y polisacáridos (cadenas de muchos monosacáridos). Los polisacáridos almidón y glucógeno son formas de almacenamiento del azúcar, mientras que la celulosa, otro polisacárido, es un importante material estructural de las plantas. Los disacáridos y polisacáridos se forman por reacciones de condensación, en las que las unidades de monosacárido se unen covalentemente con la eliminación de una molécula de agua. Pueden ser escindidas nuevamente por hidrólisis, con la incorporación de una molécula de agua.

Los lípidos son moléculas orgánicas hidrofóbicas que, al igual que los carbohidratos, desempeñan papeles importantes en el almacenamiento de energía y como componentes estructurales. Los compuestos de este grupo incluyen las grasas y los aceites, los fosfolípidos, los glucolípidos, las ceras, y el colesterol y otros esteroides. Las grasas son los principales lípidos almacenadores de energía. Una molécula de grasa está formada por una molécula de glicerol unida a tres ácidos grasos. Las grasas pueden ser no saturadas o saturadas, dependiendo de si sus ácidos grasos contienen o no enlaces dobles. Las grasas no saturadas, que tienden a ser líquidos oleosos, se encuentran más comúnmente en las plantas.

Los fosfolípidos son los principales componentes estructurales de las membranas celulares. Están formados por una unidad de glicerol, dos ácidos grasos (en lugar de los tres ácidos grasos presentes en las grasas) y un grupo fosfato al cual puede unirse otro grupo polar. A raíz de sus “cabezas” hidrofílicas y sus “colas” hidrofóbicas, los fosfolípidos se orientan espontáneamente en el agua para formar películas que son la base de la estructura de membrana. Los glucolípidos, formados por una unidad de glicerol, dos ácidos grasos y una cadena de carbohidrato corta unida al tercer carbono del glicerol, también son componentes importantes de las membranas celulares y participan en el reconocimiento de otras células.

Las proteínas son moléculas muy grandes compuestas de cadenas largas de aminoácidos, conocidas como cadenas polipeptídicas. Los veinte aminoácidos diferentes que conforman las proteínas varían de acuerdo con las propiedades de sus grupos laterales (R). A partir de estos relativamente pocos aminoácidos, se puede sintetizar una inmensa variedad de diferentes tipos de moléculas proteínicas, cada una de las cuales cumple una función altamente específica en los sistemas vivos.

La secuencia de aminoácidos se conoce como estructura primaria de la proteína. Dependiendo de la secuencia de aminoácidos, la molécula puede adoptar una entre varias formas. Los puentes de hidrógeno entre los grupos



tienden a plegar la cadena en una estructura secundaria repetida, como la hélice alfa o la hoja plegada beta. Las interacciones entre los grupos R de los aminoácidos pueden dar como resultado un plegamiento ulterior en una estructura terciaria, que a menudo es de forma globular e intrincada. Dos o más polipéptidos pueden actuar recíprocamente para formar una estructura cuaternaria.

En las proteínas fibrosas, las moléculas largas entran en interacción con otras largas cadenas de polipéptidos, similares o idénticas, y adoptan la forma de cables o láminas. El colágeno y la queratina son proteínas fibrosas que desempeñan diversos papeles estructurales. Las proteínas globulares también pueden cumplir propósitos estructurales. Los microtúbulos, que son componentes celulares importantes, están compuestos por unidades repetidas de proteínas globulares, aso-

ciadas helicoidalmente en un tubo hueco. Otras proteínas globulares tienen funciones de regulación, de transporte y de protección.

Dada la variedad de aminoácidos, las proteínas pueden tener un alto grado de especificidad. Un ejemplo es la hemoglobina, la molécula transportadora de oxígeno de la sangre, compuesta de cuatro cadenas polipeptídicas (dos pares de cadenas), cada una unida a un grupo que contiene hierro (hemo). La sustitución de un determinado aminoácido por otro en uno de los pares de cadenas altera la superficie de la molécula, produciendo una enfermedad grave, en ocasiones fatal, conocida como anemia falciforme.

Los nucleótidos son moléculas complejas formadas por un grupo fosfato, un azúcar de cinco carbonos y una base nitrogenada. Son los bloques estructurales de los ácidos desoxirribonucleico (DNA) y ribonucleico (RNA), que transmiten y traducen la información genética. Los nucleótidos también desempeñan papeles centrales en los intercambios de energía que acompañan a las reacciones químicas dentro de los sistemas vivos. El principal portador de energía en la mayoría de las reacciones químicas que ocurren dentro de las células es un nucleótido que lleva tres fosfatos, el ATP.

CUESTIONARIO

1. Distinga entre los siguientes términos: hidrocarburo/carbohidrato; glucosa/fructosa/sacarosa; monómero/polímero; glucógeno/almidón/celulosa; saturado/no saturado; fosfolípido/glucolípido; polisacárido/polipéptido; enlace peptídico/puente disulfuro/interacción hidrofóbica; estructura primaria/estructura secundaria/estructura terciaria/estructura cuaternaria; hemo/hemoglobina; base nitrogenada/nucleótido/ácido nucleico.

2. Identifique los grupos funcionales que caracterizan a los compuestos que aparecen a continuación. ¿Cuáles de éstos son hidrofílicos? ¿Cuáles hidrofóbicos?

a) CH_3COOH
Componente principal del vinagre

b) HCOOH
Ingrediente activo que deja la picadura de hormiga

c) $\begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{CH}_2 \\ | \quad | \\ \text{OH} \quad \text{OH} \end{array}$
Anticongelante

d) $\begin{array}{c} \text{H} \\ | \\ \text{H} - \text{C} = \text{O} \end{array}$
Conservante de muestras biológicas

e) $\begin{array}{c} \text{CH}_3 - \text{C} - \text{CH}_3 \\ || \\ \text{O} \end{array}$
Quitaesmalte

f) $\begin{array}{c} \text{NH}_2 \\ | \\ \text{C}_6\text{H}_5 \end{array}$
Usado en la manufactura de colorantes comerciales

3. Dibuje una fórmula estructural para a) un monosacárido; b) un ácido graso; c) un aminoácido.

4. El ácido butírico, $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$, da a la manteca rancia su olor y sabor. Dibuje su fórmula estructural.

5. Muchas de las reacciones de síntesis de los organismos vivos ocurren por condensación. ¿Qué es una reacción de condensación? ¿Qué tipo de moléculas sufren reacciones de condensación para formar disacáridos y polisacáridos? ¿Cuáles participan en la constitución de las grasas? ¿Y en la de las proteínas?

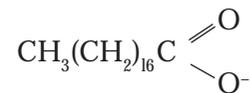
6. Los disacáridos y los polisacáridos, así como los lípidos y las proteínas, pueden ser degradados por hidrólisis. ¿Qué es hidrólisis? ¿Qué dos tipos de productos se liberan cuando se hidroliza un polisacárido como el almidón? ¿De qué manera estos productos son importantes para la célula viva?

7. ¿Qué queremos significar cuando decimos que algunos polisacáridos son moléculas de “almacenamiento” de energía y que otros son moléculas “estructurales”? Dé un ejemplo de cada uno. ¿En qué sentido debería considerarse a un polisacárido como “una molécula almacenadora de energía”?

8. Las plantas habitualmente almacenan reservas energéticas en forma de polisacáridos, mientras que en la mayoría de los animales los lípidos son la forma principal de almacenamiento de energía. ¿Por qué es ventajoso para los animales tener su reserva de energía almacenada como lípidos y no como polisacáridos? (Piense acerca de las diferencias en el “estilo de vida” de los vegetales y los animales.) ¿Qué tipos de materiales de almacenamiento esperaría encontrar en las semillas?

9. Dibuje la disposición de los fosfolípidos cuando están rodeados por agua.

10. A mediados del siglo pasado, el jabón se fabricaba hirviendo grasa animal con lejía (hidróxido de potasio). Los enlaces que unen a los ácidos grasos y la molécula de glicerol se hidrolizaban y el hidróxido de potasio reaccionaba con el ácido graso para producir jabón. Un jabón típico, disponible actualmente, es el estearato de sodio. En agua se ioniza para producir iones sodio (Na^+) y iones estearato:



Explique de qué manera funciona el jabón para atrapar y eliminar las partículas de suciedad y grasa.

11. La seda es una proteína en la cual las cadenas polipeptídicas están dispuestas en forma de hoja plegada beta. En estas cadenas, la secuencia peptídica glicina-serina-glicina-alanina-glicina-alanina aparece repetidamente. a) Dibuje la fórmula estructural de este hexapéptido y muestre los enlaces peptídicos en color. b) Explique cómo se forma un enlace peptídico.