

# 1 El cerebro humano, creador de metáforas

Sobre el verde lustroso de las innumerables copas de los árboles que forman el corazón de los bosques de Viena, allí donde mansamente mueren los Alpes austriacos para encontrar una ciudad llena de historia, de grandeza y miseria, los cuervos revolotean como anunciando que no todo está bien, que tras la apariencia amable y acogedora de esos árboles han existido el terror y la locura. En la Viena de finales del siglo XIX y principios del XX, todo sucedía: El escritor romántico que vivía dentro de aquellos cafés eternos, enhebrando palabras sobre los agujeros de su chaqueta sucia y desgarrada; el músico que había llegado de un pequeño pueblo cerca de la frontera italiana, o de Bratislava o quizás de algún poblado olvidado de Hungría, parte del imperio, para seguir el camino de los Mozart, Beethoven, Schubert, Strauss... Personajes de la cultura y la política que cambiarían el curso de la historia elegían sus cafés favoritos para alimentar sus sueños, entre ellos músicos como Mahler y Schönberg, científicos como Freud y Schrödinger o políticos como Trotsky, Herzl y el innombrable dictador de la Alemania nazi; Y, por supuesto, grandes ajedrecistas como Steinitz y Schlechter pasarían las horas jugando en estos cafés universales, donde se amontonaban escritores como Stefan Zweig, quien recogería la psicología del jugador de ajedrez en su célebre novela "*Schachnovelle*" (Novela de ajedrez). Pero ahora, en 1999, justo antes de ver llegar el tercer milenio, el ruido del tren se interpone entre los cuervos negros que acechan el alma de lejos y mis pensamientos que se amontonan unos sobre otros, a veces de manera intermitente, a veces como un continuo. Llegamos a Altenberg, mi destino de todos los días desde hace dos años. El Danubio corre paralelo a las vías del tren y alcanzo a ver un cisne blanco que nada, solo, en solemne armonía, recordándome la triste figura de Konrad Lorenz en toda su grandiosa miseria intelectual. Comienzo a caminar hacia el instituto de investigación y, mientras todas estas sensaciones que se han repetido tantas veces durante los últimos tiempos aparecen desordenadamente, una idea necesaria para resolver un problema sobre el que había reflexionado durante toda la semana se me aparece, de pronto, como salida de la nada. Esta cadena de eventos no es ningún misterio: mi percepción de los árboles centenarios, la asociación histórica con el pasado nazi del país, la conciencia de estar dentro de un tren con su cadencia rítmica de ruidos y zarandeos, el cisne sobre las aguas del río que sugiere una imagen y un sentimiento, mi acompasado movimiento corporal, que me permite caminar, y la aparición repentina de una idea sin relación alguna con mis pensamientos. No, no es ningún misterio, soy un mamífero con un cerebro.

## **Introducción general a la estructura y función del cerebro**

Este capítulo se ocupa de explorar las bases biológicas sobre las que se desarrollan los procesos cognitivos en la especie humana. Usaremos la expresión procesos cognitivos para referirnos a todos aquellos procesos que requieren cierto tipo de conocimiento. Con una definición tan difusa se pone inmediatamente de manifiesto que la mayoría de los mal llamados “animales superiores” llevan a cabo procesos cognitivos. No es casual que así sea, ya que todos ellos, incluidos los primates como la especie humana, poseen un sistema nervioso con una acumulación de tejido en la parte anterior del cuerpo que está organizado en multitud de compartimentos especializados y recibe el familiar nombre de cerebro. Incluso seres sin un sistema nervioso, pero capaces de reaccionar a estímulos del medio y elaborar una respuesta acorde con dicho estímulo, poseen propiedades cognitivas. Por ejemplo, una bacteria, en su mundo microscópico, responderá a diferentes concentraciones de alimento en solución acuosa moviéndose hacia las áreas de mayor concentración. También en el mundo vegetal encontramos ejemplos como en la planta del girasol, que seguirá la dirección del sol a lo largo del día. Pero eso no es todo, el hombre ha construido mecanismos capaces de funcionar a base de conocimiento, abriendo el camino a la posibilidad de que también estas máquinas posean capacidades cognitivas. Un termostato es capaz de encenderse y apagarse en respuesta a la temperatura del ambiente. La puerta del supermercado se abrirá al “percibir” el paso de un cliente.

En esencia este libro se ocupa del siguiente problema: ¿qué aprenderíamos acerca de nuestra mente si pudiésemos concluir que las máquinas pueden ser capaces de realizar actividades cognitivas? Y, con ello, ¿pueden las máquinas pensar? Esta extraordinaria posibilidad ha constituido el sueño de muchas generaciones, tema sobre el cual volveremos más adelante para analizarlo con mayor profundidad. Pero ahora, antes de ocuparnos de la mente y de los procesos cognitivos, vamos a detenernos en describir algunas de las particularidades básicas del cerebro, es decir su estructura y función biológica. Esta base biológica nos permitirá comprender que los procesos cognitivos, especialmente aquéllos que comúnmente se entienden como “humanos”, se apoyan en el funcionamiento del cerebro, y que éste, a su vez, depende totalmente de la forma, estructura y conexión existentes entre los elementos que los conforman: las neuronas.

### **Forma y función. Cerebro y mente**

Como todo órgano animal, el cerebro humano puede estudiarse tanto desde su perspectiva estructural como funcional. Cada uno de estos aspectos posee un interés particular y es necesario separarlos, ya que, de forma lógica, como ya apuntó el gran anatomista francés Geoffroy de Saint-Hilaire en el siglo XIX, la función debe seguir los dictados de la estructura formal para cualquier elemento anatómico. En otras palabras, las funciones que puede llevar a cabo un órgano están supeditadas al tipo de organización estructural que tiene, que incluye sus proporciones, orientaciones, conexiones y articulaciones, así como el material con el que está construido. En ingeniería este problema es bastante claro: un puente colgante de madera con tensores

de cuerda podrá tener como función permitir el paso de la gente a pie, mientras que un puente colgante de cemento armado y tensores de acero podrá poseer la función de permitir el paso de los coches, gracias a poseer unas condiciones estructurales específicas. En biología, la separación entre forma y función es fuente de intensos debates, sobre todo al evaluar los mecanismos que operan a lo largo de la evolución. Con todo, parece bastante claro que la organización estructural de la mano permite llevar a cabo diversas funciones, desde agarrar una piedra hasta tocar el piano. Pretender que la mano ha evolucionado “para tocar el piano”, por lo cual posee una estructura acorde con dicha función (es decir que “la forma sigue a la función”) es, simplemente, absurdo (si bien desde un punto de vista romántico, esta pretensión puede resultar hasta agradable). Con el cerebro ocurre lo mismo, la extraordinaria versatilidad funcional de este órgano es consecuencia directa de su organización y, por ello, es necesario prestar gran atención a las características estructurales del mismo. Los ojos, órganos de la vista, han evolucionado estructuralmente de tal modo que han podido especializarse en la recepción de estímulos luminosos, nuevamente la función sigue a la forma. Aun así, es necesario dejar claro que existe una integración sumamente estrecha entre forma y función, lo cual hace que, en ciertos casos, la separación entre una y otra sea difícil de efectuar.

Así pues, el cerebro, desde un punto de vista estructural, es un órgano extraordinariamente complejo compuesto por un entramado de miles de millones de neuronas y otras células auxiliares que, en total, forman billones de conexiones entre sí. Por otro lado, desde un punto de vista funcional, se trata de un órgano que permite evaluar las sensaciones procedentes del medio, almacenarlas, integrarlas y elaborar una respuesta de carácter adecuado para hacer frente a una situación determinada. Para poder llevar a cabo todas estas funciones, el cerebro requiere grandes cantidades de energía, hasta tal punto que, a pesar de constituir aproximadamente el 2% del peso del cuerpo, consume hasta un 20% del oxígeno y de la glucosa presentes en la sangre que le llega a través de los vasos sanguíneos cerebrales. En el capítulo siguiente nos ocuparemos de las capacidades funcionales del cerebro, es decir, del “cerebro como proceso”, comúnmente llamado mente, en donde se lo descubrirá como elaborador de mundos que representan, de un modo más o menos fidedigno, la realidad física del entorno. La mente es testigo, en cada uno de nosotros, de un modo absolutamente privado, del curso de la existencia. Es la mente quien se encarga de generar respuestas emotivas, sensaciones como las de placer, alegría, miedo u odio. ¿O es el cerebro?

## **Algunos elementos estructurales: las células del cerebro**

Desde la antigüedad se había considerado al cerebro como una masa continua de composición indefinida y que de algún modo, quizás a través de mecanismos hidráulicos, como pensaban Galeno, Descartes y numerosos filósofos de antaño, mandaba y recibía información al resto del cuerpo a través de los nervios. Estos, a su vez, eran considerados tubos huecos por donde un líquido transmitía la presión mandada por el cerebro. Gracias a los análisis histológicos y anatómicos de Santiago Ramón y Cajal, empleando técnicas de tinción con emulsiones de plata desarrolladas por Camilo Golgi, se puso de manifiesto, a finales del siglo XIX que, en realidad, el

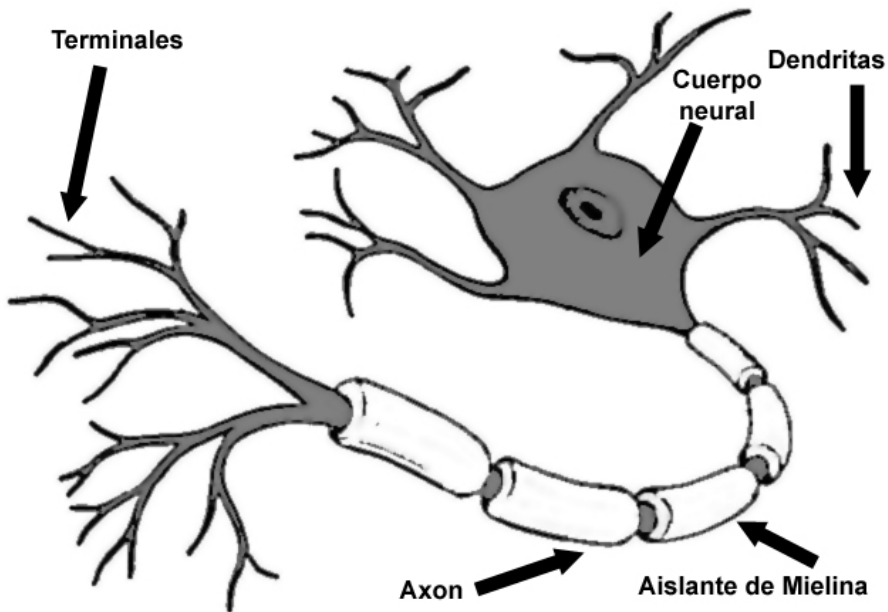
cerebro está constituido, al igual que el resto de los órganos animales, por multitud de elementos discretos denominados células y que los nervios son conglomerados de axones, una de las tres partes principales en las que se dividen las células especializadas del cerebro que se encargan de representar el mundo, almacenar recuerdos, distribuir información y generar pensamientos: las neuronas.

Dos tipos fundamentales de células conforman el cerebro: las neuronas y las células de la glía. Mientras que las neuronas llevan a cabo un papel más activo respecto al almacenamiento y conducción de la información, las células de la glía poseen un papel un tanto más pasivo, nutriendo a las neuronas y proporcionando un material aislante para los axones neurales (como si los axones fueran los cables de cobre y las células gliales constituyeran el revestimiento de plástico) facilitando el viaje de iones a través de los cables. Por término medio hay aproximadamente unas 10 células gliales por cada neurona, pero debido a que su tamaño es unas diez veces menor, el espacio que ocupan dentro del cerebro es más o menos el mismo. Cuando se habla coloquialmente de “materia gris” se está en realidad haciendo referencia a aquellas áreas del cerebro (principalmente las más superficiales) que muestran una gran densidad de cuerpos neuronales y carecen de células de la glía auxiliares, mientras que la “materia blanca” del cerebro aparece como consecuencia del color blanco de la mielina, sustancia que secretan los oligodendrocitos para aislar a los axones de las neuronas. Los oligodendrocitos (células gliales, al igual que los astrocitos y las células de Schwann) revisten a los axones secretando mielina. Como ya hemos comentado, este revestimiento constituye un auténtico aislante, interrumpido cada cierto trecho dejando huecos (denominados nódulos de Ranvier). En estos “huecos” hay una gran concentración de canales proteicos situados en la membrana plasmática neuronal, que permiten el paso de los iones encargados de transmitir el paso de la energía eléctrica a través de esta membrana (estos iones o elementos con carga eléctrica son fundamentalmente de sodio, potasio y calcio). A pesar de la importancia que poseen las células de la glía para el correcto funcionamiento del cerebro, nos ocuparemos de describir las neuronas, ya que son éstas las que están involucradas en la generación de procesos cognitivos. Mencionemos simplemente que en los últimos años se han encontrado muchísimas más funciones para las células gliales además de las clásicas funciones de soporte, protección, control del pH del medio y nutrición (gracias a su relación íntima con los vasos sanguíneos). Estas nuevas funciones, mucho más activas, pueden incluso influir en la comunicación entre neuronas por medio de la regulación de las concentraciones iónicas a uno y otro lado de las membranas neuronales. Esto las haría participar también, de manera indirecta, en el procesamiento de la información, una función que siempre ha estado reservada exclusivamente a las neuronas.

## **Las mariposas del alma**

Con todo, las protagonistas indiscutibles del cerebro son las neuronas. Se trata de células muy especializadas que, gracias a su tipo de organización singular, contribuyen a la recepción, almacenamiento, integración y distribución de la información que un organismo experimenta a lo largo de su existencia. Ramón y Cajal, quien dedicó su carrera científica al estudio del cerebro, cautivado por la complejidad y

delicadeza de la forma externa de las neuronas y consciente de su importancia como fundamento biológico del pensamiento, las denominó “esas mariposas del alma”. El cerebro humano está constituido aproximadamente por 100.000 millones de neuronas (no se sabe exactamente el número, pero ésta, como cualquier otra, es una estimación razonable) y puede considerarse como una central de datos que recibe, almacena, integra y transmite de un modo no caótico un tipo de información en forma electroquímica. Estas células de morfología y tamaño definidos dentro de un rango de variación bastante amplio, se relacionan entre sí mediante conexiones entre sus estructuras de entrada y salida, las dendritas y los axones respectivamente, a través de elementos de conexión denominados “sinapsis” (especie de botón, clavija o enchufe en la metáfora del circuito eléctrico, aunque de organización más compleja). Cada neurona posee conexiones con aproximadamente otras 10.000 neuronas, con lo cual el resultado final, la estructura de conectividad del cerebro, presenta un elevadísimo número de conexiones.



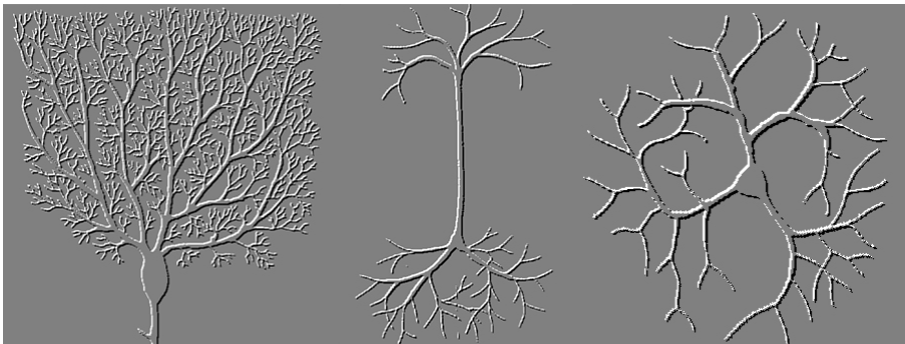
**Figura 1.1** Diagrama mostrando las partes principales de una neurona.

Como ya hemos apuntado, la estructura morfológica de una neurona consta fundamentalmente de tres partes bien diferenciadas: el cuerpo neuronal, el axón y las dendritas. En el cuerpo neuronal se aloja el núcleo de la célula así como diversas organelas, como por ejemplo múltiples mitocondrias para la generación de energía. El axón, un filamento de longitud variable (de algunos micrómetros hasta llegar a unos 150 cm como en el caso de los axones que inervan el pie desde la médula espinal) es el que ofrece la vía de transmisión por la cual viajan los potenciales de acción

(electricidad generada por la diferencia de carga entre iones químicos, especialmente sodio y potasio), que se encarga de transmitir los estímulos a otras neuronas. Finalmente, las dendritas, estructuras filamentosas de longitud menor que la de los axones pero presentes en gran número. Las dendritas son las encargadas de recibir los estímulos procedentes de los axones de otras neuronas. Otros elementos importantes presentes en las neuronas que merecen cierto comentario son las vesículas (microsomos), que transportan en su interior los mensajeros químicos (como los neuropéptidos) necesarios para comunicar una dendrita con un axón, y los canales de membrana, formados por proteínas de muy diversa naturaleza por donde entran y salen los iones químicos que contribuyen a la transmisión de corriente electroquímica.

Por otro lado unas estructuras internas denominadas microtúbulos, presentes en el interior de la mayoría de las células de un animal, han comenzado a ser consideradas con cierta atención. Estas estructuras filamentosas formadas mayormente por proteínas como la tubulina confieren cierta estabilidad a la forma de las ramas neurales y están implicadas en el transporte de neurotransmisores desde su lugar de producción en el soma o cuerpo celular hasta las terminaciones sinápticas. Es posible, como postula Penrose, que exista alguna relación entre los microtúbulos y la transmisión de la información entre neuronas siguiendo un mecanismo fundamentalmente cuántico. Sin embargo, esta fascinante teoría que otorga a los microtúbulos un papel crítico hasta el punto de considerarlos necesarios para la emergencia de la conciencia, dista mucho de estar comprobada.

Durante el desarrollo embrionario del cerebro y, en parte, bajo las directrices espaciales de las células de la glía, se van estableciendo las conexiones neurales entre distintas áreas. Además, se van distinguiendo áreas conteniendo neuronas de un tipo determinado que presentan una bioquímica, unas condiciones fisiológicas y unos tipos de conexiones particulares. Dentro de los tipos neuronales que se distinguen según su morfología se encuentran las células piramidales, las células de Purkinje, las células motoras o las células estrelladas.



**Figura 1.2** Algunos tipos de neuronas. Purkinje, piramidal y estrellada.

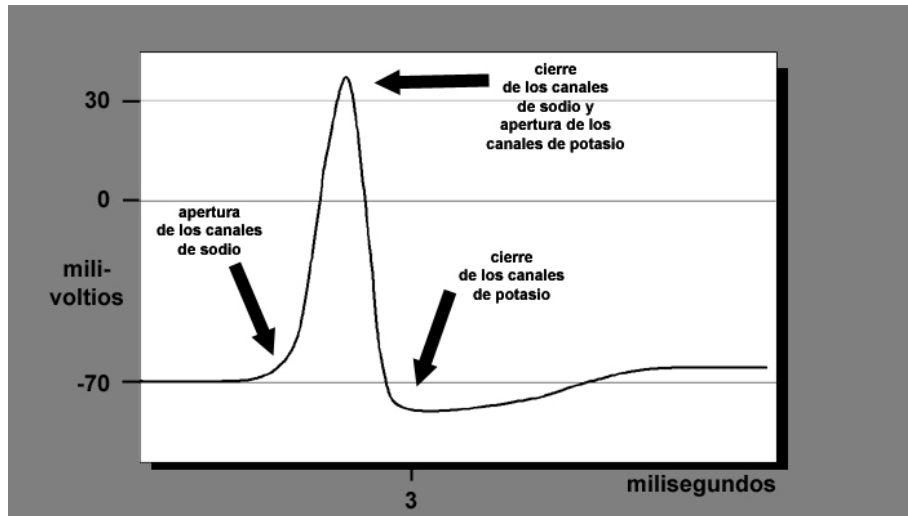
Además de esta división morfológica, los tipos neurales se van diferenciando de acuerdo a la clase de información que serán capaces de procesar. Así, se forman neuronas motoras, interneuronas y neuronas sensoriales. Las neuronas motoras son aquéllas que estimulan el movimiento de alguna parte del cuerpo, como por ejemplo las neuronas que inervan los músculos que mueven los dedos de la mano. Mientras los cuerpos de estas neuronas se encuentran alojados en la médula espinal, sus axones pueden presentar longitudes enormes de hasta un metro y medio, para llegar a la parte del cuerpo indicada (por ejemplo el dedo gordo del pie). Las neuronas sensoriales, por su parte, reciben información a partir de los órganos de los sentidos (tacto, oído, vista, olfato y gusto), ocupándose de traducir (el término científico es “transducir”) el estímulo físico que llega a las células especializadas de cada órgano (células receptoras) en el estímulo electroquímico típico de las neuronas que se transmite hacia las zonas especializadas del cerebro. En la piel, por ejemplo, las células receptoras son las propias terminaciones nerviosas, mientras que en la vista son células (conos y bastones de la retina) que envían la información de la impresión luminosa hacia las terminales de las neuronas sensoriales. El estudio de la estructura y el funcionamiento de la vista es uno de los temas más fructíferos en neurociencia y está aportando gran cantidad de información tanto del funcionamiento del cerebro en su conjunto como del problema más profundo de la naturaleza de la conciencia. Por último, las interneuronas son neuronas que juegan un papel de intermediarias entre las sensoriales y las motoras. Así, durante el desarrollo embrionario se establecen rutas donde las neuronas sensoriales transducen la información recibida del medio y la transmiten al cerebro. Allí, esta información se integra y procesa y se produce un nuevo tipo de señal que va a parar a una neurona motora, la cual provoca algún tipo de movimiento o acción. Por su parte, en los actos reflejos se establece un circuito (el arco reflejo) que no pasa por el cerebro, con lo que la acción es mucho más rápida e inconsciente.

## **Algunos elementos funcionales: corriente electroquímica y comunicación neuronal**

En lo que concierne al entramado de neuronas, el cerebro es como un gran circuito electrónico (de organización mucho más compleja) donde los axones y las dendritas hacen las veces del cableado por el que viaja la corriente electroquímica. Dos aspectos fundamentales del funcionamiento neuronal merecen ser atendidos: la generación de corriente por medio de potenciales de acción y la comunicación química entre axones y dendritas mediante la liberación de mensajeros químicos denominados neurotransmisores. Estos dos aspectos funcionales son de gran importancia, y configuran un “lenguaje” electroquímico de increíble alcance.

Un potencial de acción es un proceso por el cual se genera una cascada de liberación de energía eléctrica, producida por la despolarización de la membrana en alguna parte de la neurona. Esta despolarización se lleva a cabo gracias a una serie de canales proteicos presentes en las membranas que permiten, de un modo selectivo, el paso de los iones químicos entre el interior y el exterior de la célula. Simplificando, la neurona o neuronas pre-sinápticas estimulan, gracias al “envío” de neurotransmisores, a otra neurona (denominada post-sináptica), produciendo una despolarización en la

membrana plasmática de la célula post-sináptica, la cual evalúa todas las contribuciones individuales de las dendritas sobre esa porción de la neurona. En cierto modo, es un problema estadístico, en donde la probabilidad de disparo de la célula post-sináptica es directamente proporcional a la suma de las excitaciones e inhibiciones de todas las dendritas aferentes (dendritas procedentes de otras neuronas). Se habla de despolarización porque, en estado de reposo, el interior de la neurona posee un voltaje de unos -70 milivoltios respecto al exterior de la misma y cuando se permite el paso a los iones de sodio, el interior pasa a 0 milivoltios (otro fenómeno, el de la hiperpolarización, ocurre cuando la diferencia de potencial aumenta).



**Figura 1.3** Potencial de acción. La membrana de la neurona se despolariza y se genera una conducción eléctrica con una transmisión característica gracias al paso de iones.

Al detenernos en el detalle de la estructura y función de las neuronas se hace evidente que la metáfora del cableado no se sostiene. En efecto, los axones reciben y transmiten los potenciales de acción por etapas, ya que la conductancia del axón es muy pequeña y el potencial debe generarse cada cierto trecho para poder ser transmitido a largas distancias. Más aún, el potencial de acción no se transmite directamente entre neuronas, como sucedería en un cableado eléctrico normal, sino que es necesaria la participación de moléculas intermediarias que contribuyen a esa transmisión dejando señales para que las posibilidades de que el potencial de acción continúe en otra neurona cambie (si bien, en ciertos casos, cuando el espacio sináptico es muy estrecho, el potencial puede “saltar” de la neurona pre- a la post-sináptica). Este último aspecto del funcionamiento neuronal es muy importante, porque constituye la base del funcionamiento cerebral. Cada axón posee ramas colaterales por donde se distribuye el potencial de acción. Estas ramas colaterales conectan (hacen sinapsis) con aproximadamente 10.000 dendritas de miles de neuronas. Para que alguna neurona se estimule y transmita el paso de la corriente a través de su axón y de sus ramas

colaterales es necesario que pase el “umbral de activación” eléctrica. Para evaluar si se ha traspasado dicho umbral, se suman las contribuciones de todas las dendritas, determinado por el resultado de las excitaciones e inhibiciones recibidas y que, a su vez, dependen del tipo del neurotransmisor liberado. Otro aspecto que aleja el funcionamiento eléctrico de las neuronas de la metáfora del cable es el hecho de que, en las neuronas, la corriente se mueve a base de pulsos. Una vez que la neurona ha superado el umbral de activación y, consecuentemente, ha disparado su propio potencial de acción, necesita un periodo (periodo refractario) de entre 200 y 500 milisegundos para recuperarse y volver a estar dispuesta para el próximo disparo.

Un fenómeno que debe ser comentado y que podría estar detrás de la generación de las actividades cognitivas superiores e incluso de la manifestación de la conciencia es el fenómeno de “*binding*” (unión o asociación) por el cual un grupo de neuronas disparan al mismo tiempo. Esta “sincronía” del disparo de las neuronas se puede registrar con los métodos que se comentan más abajo, tales como la inserción de microelectrodos en áreas específicas del cerebro. De este modo, la actividad “rítmica” de grupos neuronales puede ser la causa de la posibilidad de llevar a cabo funciones cognitivas tales como la percepción, el pensamiento, etc. Esto ocurriría porque para poseer una experiencia consciente sobre una escena es necesario unir distintas propiedades de la misma de un modo coherente, lo cual puede conseguirse a través de los potenciales de acción de las neuronas gracias al fenómeno de *binding*. Por ejemplo, cuando observamos el mar en movimiento, el cerebro debe correlacionar distintos eventos de la percepción tales como el color del agua, el olor del yodo, el movimiento de las olas, la referencia del horizonte, el sonido de las gaviotas y cualquier otro fenómeno circunstancial como puede ser el olor de las sardinas a la parrilla que se están preparando para culminar el día en la playa. Todos estos eventos, sensaciones, percepciones y sentimientos deben codificarse y representarse en el cerebro como una unidad, configurando la experiencia consciente de un día placentero en la playa. Lo mismo ocurre con la experiencia consciente de un jugador de ajedrez. El color del tablero, la textura de las piezas, el sonido del reloj, la batalla mental por asociar la posición del tablero con los recuerdos de otras partidas, todo ello debe asociarse a la presencia física en cierto recinto de cierta ciudad y la tumultuosa realidad del mundo exterior. El conjunto de estos elementos conforma una unidad de experiencia vital que se procesa en todo momento, consciente o inconscientemente, en la mente del jugador. Y para que ello ocurra, es necesario que exista ese fenómeno de sincronía entre disparos neuronales de partes distintas de la corteza cerebral.

Como se puede colegir a raíz de esta brevísima descripción, el funcionamiento global del cerebro es muchísimo más complejo que el de una central eléctrica, sobre todo porque la información está distribuida en el cerebro de tal modo que las conexiones en serie son escasas –quizás inexistentes dentro del cerebro dado el número de ramas colaterales de los axones que también distribuyen la información– con respecto a las conexiones en paralelo. Esto significa que la actividad eléctrica está repartida en diferentes áreas cerebrales. Las neuronas forman redes o entramados particulares que dependen tanto del desarrollo como del aprendizaje. Estas redes poseen patrones de conectividad específicos, aunque no estáticos y, en muchas

ocasiones, como veremos más adelante, se las puede identificar con módulos funcionales o partes de módulos funcionales determinados.

Además, ya hemos mencionado el importante hecho de que, dependiendo del tipo de neurotransmisor liberado en el botón sináptico, la conexión contribuirá a excitar o inhibir a la neurona post-sináptica. Este tipo de regulación de la comunicación neural es de gran importancia y recibe el nombre genérico de “neuromodulación”. Gracias a la acción diferencial de distintos tipos de neurotransmisores, el cerebro puede entrar en distintos estados conscientes, tales como la vigilia y el sueño. A grandes rasgos podemos distinguir entre el sistema colinérgico y el sistema aminérgico, grupos de neurotransmisores que se ocupan de aumentar y de inhibir la excitación neuronal respectivamente. La neuromodulación no es simplemente importante para promover distintos estados de conciencia, sino también para contribuir a generar recuerdos a nivel celular y, por ende, como base para el aprendizaje y la memoria.

## **Mecanismos celulares que permiten almacenar recuerdos**

La memoria es un proceso cognitivo necesario para el aprendizaje. Es el componente básico de la naturaleza del comportamiento inteligente. El cerebro necesita poseer un modo por el cual la información registrada por medio de los órganos de los sentidos o creada por el pensamiento pueda ser almacenada y recuperada convenientemente. Esto se consigue gracias a diversos sistemas de memoria, como la memoria de trabajo y la memoria a largo plazo, de los cuales nos ocuparemos en el siguiente capítulo. Sin embargo, debe existir algún mecanismo molecular y/o celular que permita efectuar dicho almacenamiento. Y esto debe ocurrir, como no podía ser de otro modo, dentro de las neuronas.

En los años cuarenta Hebb propuso un mecanismo para reforzar las conexiones entre dos neuronas (memoria neural) basado en la necesidad de que tanto la neurona pre-sináptica como la post-sináptica se activen (disparen) de un modo congruente o asociativo (cuando dispara una, aumenta la probabilidad de que dispare la otra). Esto supondría una reestructuración metabólica de ambas células, potenciando su asociación. Otro mecanismo que permite el aprendizaje a nivel sináptico es el de modulación de una tercera neurona que actúa reforzando la sinapsis entre la neurona pre- y post-sináptica. En este caso la neurona moduladora refuerza únicamente la actividad de la neurona pre-sináptica.

Existe un tipo de conexiones neuronales que están directamente relacionadas con la generación de recuerdos y el aprendizaje. Se trata de unos canales de membrana especiales denominados NMDA (N-metil D-aspartato). Estos canales dependen para su activación de la presencia del aminoácido glutamato, que actúa como neurotransmisor, de la despolarización de la membrana y la estimulación de la neurona por una segunda vía. Los canales de NMDA contribuyen a establecer lo que se denomina “potenciación a largo plazo” en aquellas sinapsis en donde aparecen. Se ha visto que son especialmente numerosas en las membranas de las neuronas del hipocampo, región cerebral que está relacionada con el almacenamiento de recuerdos (más abajo habla-

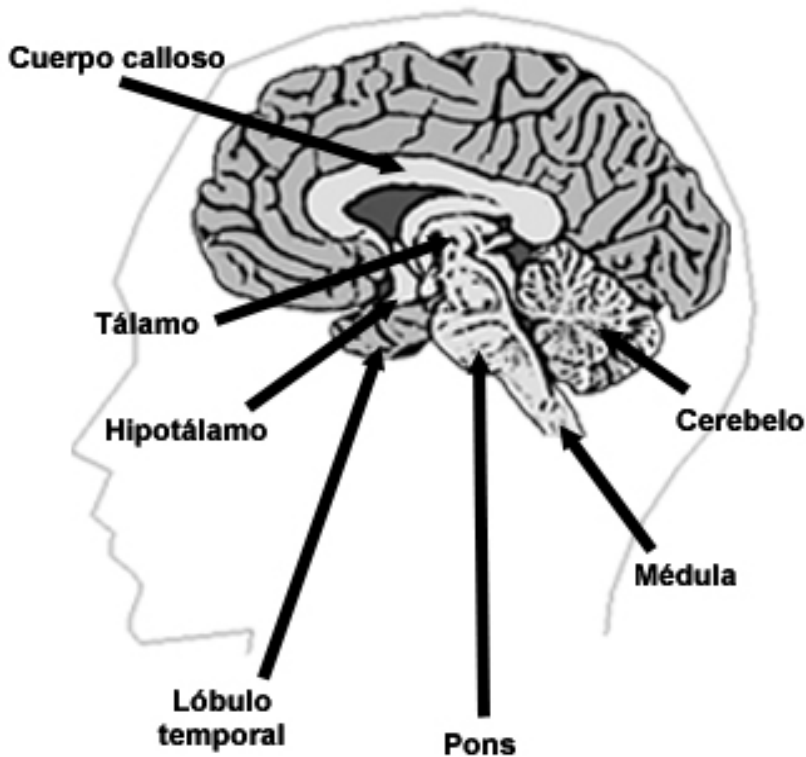
remos de las regiones del cerebro). El receptor, situado en la membrana post-sináptica, recibe la señal eléctrica gracias a la despolarización de la membrana, que ocurre independientemente por la acción de otro tipo de receptores post-sinápticos. Esta despolarización induce al receptor NMDA a liberar magnesio y permitir a su vez la unión con el glutamato, lo cual induce la entrada de calcio dentro de la célula. Al parecer, la entrada de calcio provoca una cascada de reacciones que culmina en la liberación de óxido nítrico, un gas que actúa como mensajero de un modo inverso, sobre la neurona pre-sináptica. Existe un mecanismo de retroalimentación entre las dos células, mediado por el glutamato y el óxido nítrico, haciendo que la relación sináptica se potencie (a igual estímulo mayor respuesta), constituyendo un mecanismo de memoria celular, de ahí el nombre de potenciación a largo plazo de la sinapsis.

## **Organización básica del cerebro en regiones funcionales**

El sistema nervioso en los vertebrados superiores se divide en central y periférico. El sistema nervioso central o SNC está compuesto por el cerebro y la médula espinal. El cerebro se aloja en la cabeza y está protegido por la caja craneana, y un conjunto de huesos planos fuertemente conectados entre sí mediante elaboradas suturas. Además, el cerebro se encuentra protegido por tres membranas: duramadre, piamadre y aracnoides. Estas membranas, también denominadas “meninges”, protegen a la masa cerebral de golpes contra la parte interna de los huesos del cráneo así como de posibles infecciones. El cerebro posee una masa celular de entre 1,3 y 1,5 kilos de peso medio para las mujeres y los hombres adultos respectivamente. La médula espinal posee también un conjunto de huesos que la protegen, las vértebras, distribuidas a lo largo de toda su longitud como si fueran anillos superpuestos uno encima del otro. Los espacios intervertebrales, protegidos por discos cartilagosos, dejan paso a los nervios que comunicarán al resto del cuerpo con el cerebro a través de la médula espinal. Estos nervios forman el sistema nervioso periférico y, conectados a la médula, llegan a todas las partes del cuerpo. Los nervios se encargan de recoger información tanto del exterior como del interior del organismo, que luego se procesa en el cerebro para elaborar una respuesta adecuada. Esta respuesta puede ser de tipo motora (un movimiento, por ejemplo un manotazo para espantar a un mosquito), o no (un pensamiento). Por otro lado, el control de los órganos vitales se efectúa de un modo automático, también gracias a la actuación concertada de nervios y músculos.

El cerebro posee varias regiones delimitadas anatómica y/o funcionalmente. En una primera aproximación hay que distinguir entre el cerebro posterior, medio y anterior (este último es el que muestra la imagen tan popular de los hemisferios cerebrales). El cerebro posterior (también llamado inferior) consta del tallo cerebral, que conecta al cerebro con la médula espinal, el cerebelo, que constituye una estructura singular inmediatamente posterior al tallo, la médula, el pons y la zona reticular. Funcionalmente las estructuras del cerebro inferior son las que controlan las actividades vitales del cuerpo tales como la respiración, el control de los latidos del corazón o la digestión. También están encargadas de coordinar los movimientos corporales, especialmente el cerebelo. El pons recibe información de las áreas visuales y la formación reticular controla el paso de la condición de sueño a la vigilia. El

cerebro medio se asienta sobre el cerebro inferior y se divide en el tegmentum o pedúnculo basal y el tectum (con dos zonas, el colículo inferior y superior). Esta parte del cerebro controla actividades motoras, visuales y auditivas (aunque en humanos tanto las áreas visuales como auditivas se encuentran principalmente en la neocorteza del cerebro anterior). El cerebro anterior (o superior) está muy desarrollado en humanos en forma de hemisferios con sus circunvoluciones y surcos y con estructuras internas de gran importancia. Es el gran desarrollo del cerebro anterior (especialmente la neocorteza) el que confiere principalmente las condiciones para la emergencia de las funciones cognitivas superiores. Entre otras estructuras que se encuentran en esta parte del cerebro, se distinguen el tálamo (centro de coordinación de diversas áreas sensoriales), el hipotálamo (controla actividades primarias como la alimentación, la huida, la lucha y el sexo; regulación de la temperatura corporal, sueño y emociones) y algunas estructuras del sistema límbico (centro principal de control de las emociones, del que también forma parte el hipotálamo), tales como el hipocampo (esencial para fijar la formación de memorias recientes) o la glándula pineal (asiento del alma según Descartes) y los ganglios basales, que actúan controlando secuencias motoras.



**Figura 1.4** Diagrama del cerebro en corte sagital mostrando las áreas más importantes.