

Introducción

Para entender la forma en que el encéfalo y la médula espinal controlan nuestras sensaciones, pensamientos, actos voluntarios y mucho más, necesitamos conocer la unidad fundamental del sistema nervioso (la neurona) así como sus células de sostén y sus redes químicas y eléctricas.

Las células nerviosas –llamadas también neuronas– se relacionan con el procesamiento de la información y su transferencia a otras neuronas de las complejas redes que constituyen el encéfalo. Resulta seductor comparar las neuronas con elementos de circuitos electrónicos, pero aun cuando existen ciertas semejanzas, hay también diferencias significativas.

Señalización eléctrica y química

Las neuronas pueden enviar información a grandes distancias mediante un mecanismo llamado potencial de acción, el cual consiste en una onda de cambio desplazable en el estado eléctrico de la membrana del axón (una prolongación neuronal). El potencial de acción tiene la característica de ser de “todo o nada”, es decir, una vez que inicia se ejecuta hasta su término, desplazándose por el axón hasta el final. Las secuencias de potenciales de acción a través de un axón proporcionan el altamente confiable transporte de datos.

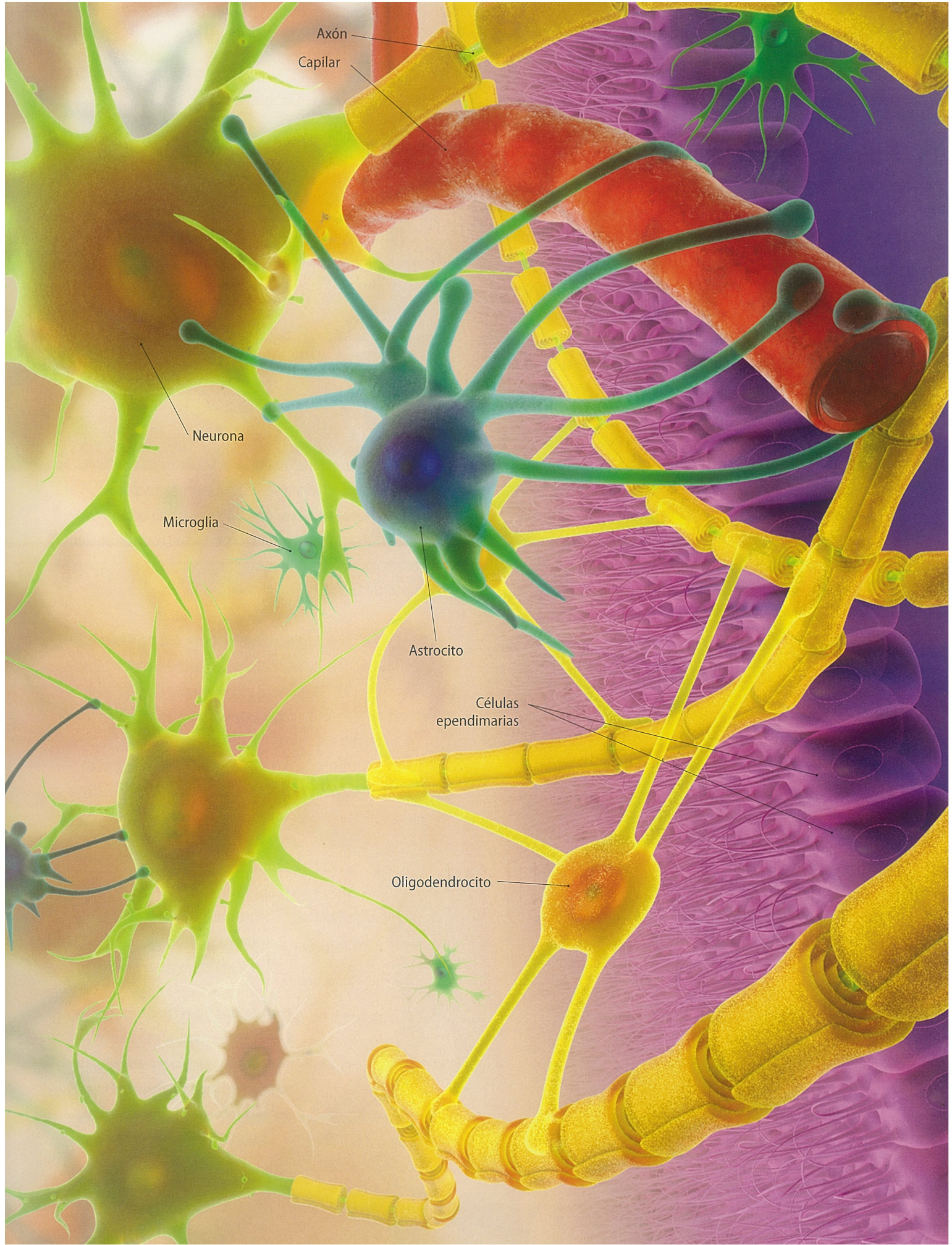
Cuando un potencial de acción llega al extremo axónico, la información se debe proyectar a otras células nerviosas. En este punto, las neuronas pueden usar un mecanismo químico, o bien, eléctrico: el primero es el más común. La trasmisión química depende de la liberación de moléculas, llamadas neurotransmisores, hacia la superficie de otra neurona. Los neurotransmisores, a su vez, inducen cambios eléctricos en las membranas de las neuronas que contactan, lo cual genera cambios en el comportamiento eléctrico de éstas y en el paso de información más adelante de la cadena de células nerviosas.

Soporte de otras células

Las neuronas están tan especializadas en el procesamiento de información que requieren de otros grupos de células para que las apoyen y conserven su ambiente local en un estado óptimo. Tales células forman una capa lipídica alrededor de los axones para favorecer la conducción eléctrica, o mantienen el balance de sustancias químicas y átomos cargados en el espacio tisular, fuera de las células nerviosas, en el nivel más adecuado para el funcionamiento neuronal. Otras células actúan como centinelas, vigilando al tejido encefálico de invasores y activando el sistema inmunológico cuando se requiere protección.

El tejido nervioso tiene tal número de delicadas prolongaciones estrechamente unidas que se deben colocar barreras especiales para detener el paso de grandes moléculas, bacterias e incluso de los propios eritrocitos del cuerpo. Estas barreras se encuentran entre el tejido encefálico y los espacios líquidos a su alrededor (sangre y LCR) y dependen de estrechas uniones entre las células de revestimiento de los vasos sanguíneos del encéfalo. Muchas de las células de soporte también tienen prolongaciones que se ponen en contacto con los vasos sanguíneos y auxilian en la transferencia de nutrientes a las neuronas.

→ **El tejido nervioso central contiene neuronas y células de sostén (astrocitos, oligodendrocitos y microglia), vasos sanguíneos y células que tapizan los ventrículos (células ependimarias).**



Axón
Capilar

Neurona

Microglia

Astrocito

Células
ependimarias

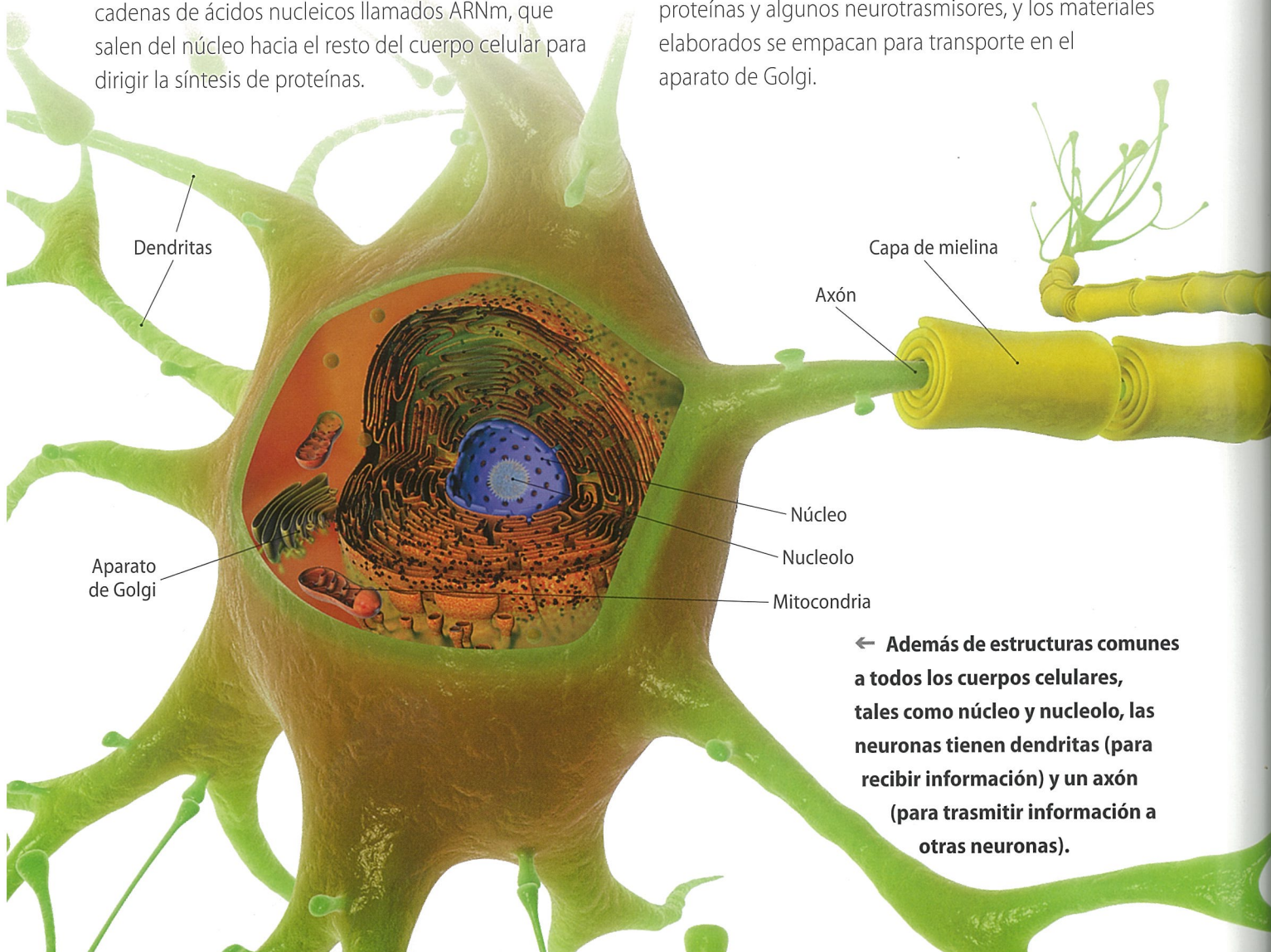
Oligodendrocito

Neuronas

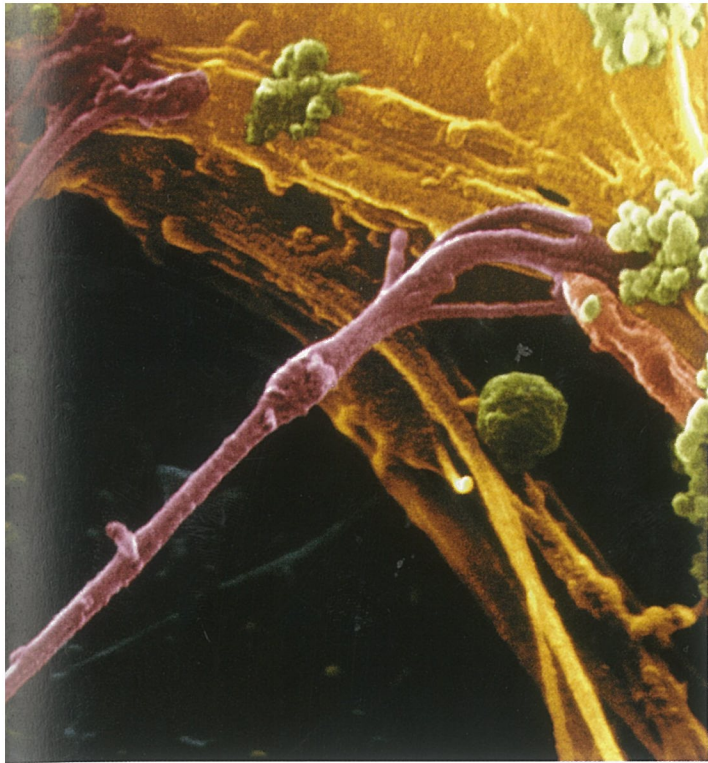
Las neuronas son células especializadas del sistema nervioso y conducen impulsos eléctricos. Son como otras células del organismo, ya que poseen un núcleo rodeado de citoplasma, pero también tienen características especiales que permiten su tarea de procesamiento de información.

Una neurona típica posee un cuerpo que, como otras células, contiene un núcleo y citoplasma circundante. El núcleo guarda la información genética (en forma de código genético de ADN) responsable de dirigir la actividad química neuronal. Las neuronas tienen con frecuencia un nucleolo bien desarrollado dentro del núcleo. El nucleolo dirige la formación de cadenas de ácidos nucleicos llamados ARNm, que salen del núcleo hacia el resto del cuerpo celular para dirigir la síntesis de proteínas.

El citoplasma que rodea al núcleo contiene toda la maquinaria química para producir la energía que utilizan las neuronas, sintetizar proteínas y mensajeros químicos (neurotransmisores) y empacar estas sustancias para transportarlas a distintas partes de la célula. La energía se produce en estructuras llamadas mitocondrias, los ribosomas sintetizan proteínas y algunos neurotransmisores, y los materiales elaborados se empaquetan para transporte en el aparato de Golgi.



← Además de estructuras comunes a todos los cuerpos celulares, tales como núcleo y nucleolo, las neuronas tienen dendritas (para recibir información) y un axón (para transmitir información a otras neuronas).



↑ **Micrografía donde se observa una neurona (amarillo), sobre la cual los axones (rosa) han formado sinapsis.**

Qué distingue a una neurona

Las neuronas poseen dos características distintivas asociadas con su tarea de procesamiento de información. Éstas son las finas ramificaciones, llamadas dendritas, y un largo proceso, el axón. Una neurona típica tiene una amplia ramificación dendrítica, que consiste en dendritas que se extienden hasta unos 5 mm en algunos casos. El árbol dendrítico recibe información de otras neuronas, usualmente mediante sinapsis químicas, sitios en donde se liberan los neurotransmisores en discretas áreas de la superficie de la dendrita. El árbol dendrítico transmite impulsos eléctricos hacia el cuerpo neuronal.

Los axones se pueden extender en distancias que van desde unas décimas de mm hasta casi 1 m en el caso de algunas neuronas cuyos axones salen de la médula espinal. Los largos axones se ven habitualmente en las principales vías nerviosas que controlan la función motora o llevan información sensorial hacia arriba de la médula espinal. El extremo del axón puede estar muy ramificado, de modo que una neurona puede hacer contacto con muchas otras.

Esclerosis múltiple y pérdida de mielina

Las proteínas que contiene la mielina son poderosos inductores de respuestas inmunológicas. Si el cuerpo integra una respuesta inmunitaria contra su propia mielina del SNC, la enfermedad resultante se denomina esclerosis múltiple, caracterizada por episodios recurrentes de pérdida de mielina en el encéfalo, los nervios ópticos y la médula espinal. La pérdida de las capas de mielina altera la conducción de impulsos nerviosos a lo largo de los axones afectados.

Los axones conducen impulsos en sentido contrario al cuerpo neuronal. La transmisión eléctrica de los impulsos hacia el extremo axónico se realiza de forma más rápida y segura por una sustancia lipídica especial, llamada mielina, que rodea al axón (capa mielínica). El extremo final de cada axón (axón terminal) puede terminar en finos procesos llamados botones terminales, que son los sitios de contacto directo con los árboles dendríticos, cuerpos neuronales o incluso axones de otras neuronas.

A través de sus dendritas y axones, las neuronas se conectan para formar circuitos nerviosos, de forma muy parecida a como una computadora integra muchos componentes para formar circuitos eléctricos.

Esqueleto neuronal y sistema de transporte

Dentro del axón y de algunas partes del cuerpo neuronal hay una red de hilos conocidos como neurofilamentos, que constituyen el esqueleto de la neurona. Los neurotúbulos son pequeñas estructuras tubulares que proporcionan un sistema de transporte a través del cuerpo celular, las dendritas y el axón. Existen dos tipos de transporte a lo largo del axón: rápido y lento. El primero (10/40 cm/día) se usa para llevar neurotransmisores, enzimas para formar neurotransmisores y componentes membranales del extremo del axón. El transporte lento (0.1-2 mm/día) lleva los componentes

del esqueleto celular hacia el extremo del axón para reconstruir la estructura interna neuronal. El transporte del extremo axónico al cuerpo neuronal es importante para detectar el ambiente local en el axón terminal. Este transporte retrógrado es particularmente importante durante el desarrollo, cuando los axones deben probar la región a través de la cual están creciendo, a fin de elegir la ruta correcta. También se usa para eliminar desechos, pero esto puede ser peligroso si los desechos que se van a mandar al cuerpo celular son infecciosos, por ejemplo virus de la rabia y la poliomielitis.

Materia gris y blanca

Cuando los primeros neuroanatomistas empezaron a estudiar cerebros recién extraídos del cráneo, notaron que algunas partes eran de color grisáceo, mientras otras tenían una apariencia blanca. Ahora se sabe que la materia gris contiene cuerpos neuronales y dendritas con algunas terminaciones axónicas, mientras que la materia blanca carece de cuerpos neuronales y consiste en axones muy unidos con capas de mielina –la coloración blanca se debe al alto contenido lipídico de la mielina que envuelve a los axones. En algunas partes del encéfalo la materia gris está en la parte

exterior y la blanca en la interior (p. ej., la corteza cerebral), mientras que otras regiones del SNC (p. ej., la médula espinal) tienen la materia gris en un área central, rodeada de materia blanca. Otras partes del encéfalo (como el tronco encefálico) tienen materia gris y blanca mezcladas, pero la blanca está usualmente formando columnas, haces o tractos.

Tipos de neuronas

El tipo más simple de neuronas tiene un cuerpo celular y sólo una o dos prolongaciones. Esta clase de neuronas incluye las células ganglionares que llevan información sensorial de órganos de la piel, los músculos, las articulaciones o la pared intestinal hacia el sistema nervioso central. Los cuerpos neuronales se localizan en grupos fuera del SNC (en los ganglios sensoriales de los nervios espinales o craneales). Una de las prolongaciones neuronales va hacia la piel o a la articulación; la otra, hacia la médula espinal o al tronco encefálico. En el caso de las neuronas ganglionares sensoriales que llevan información sobre tacto fino o vibración del pie, el proceso del pie al cuerpo celular puede medir hasta 1 m, y el proceso que penetra en la médula espinal puede recorrer hasta 60 cm hacia el tronco encefálico antes de hacer contacto con otra neurona.

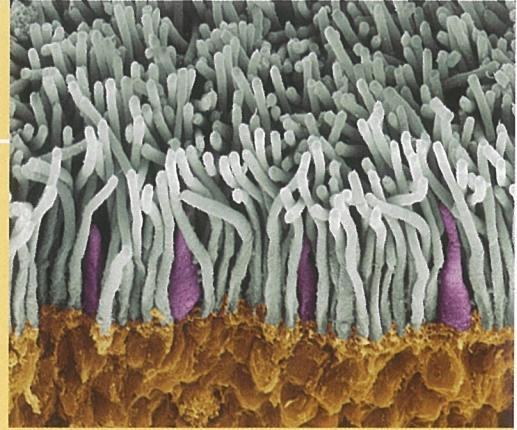
En la profundidad del SN hay neuronas de formas muy sofisticadas, el ejemplo más notable es la célula de Purkinje, en el cerebelo. Ésta consiste en un cuerpo celular con un árbol dendrítico que se extiende en forma de abanico orientado en ángulos rectos hacia los pliegues de la superficie cerebelosa. Este árbol dendrítico asigna un área de superficie que haga contacto con los axones de otras neuronas.



← La materia blanca está constituida por masas de axones. Esta imagen en 3-D permite observar la orientación normal de las fibras de materia blanca en una vista superior del cerebro. Las fibras ascendentes y descendentes están en verde, el cuerpo calloso en rojo y las conexiones locales en morado.

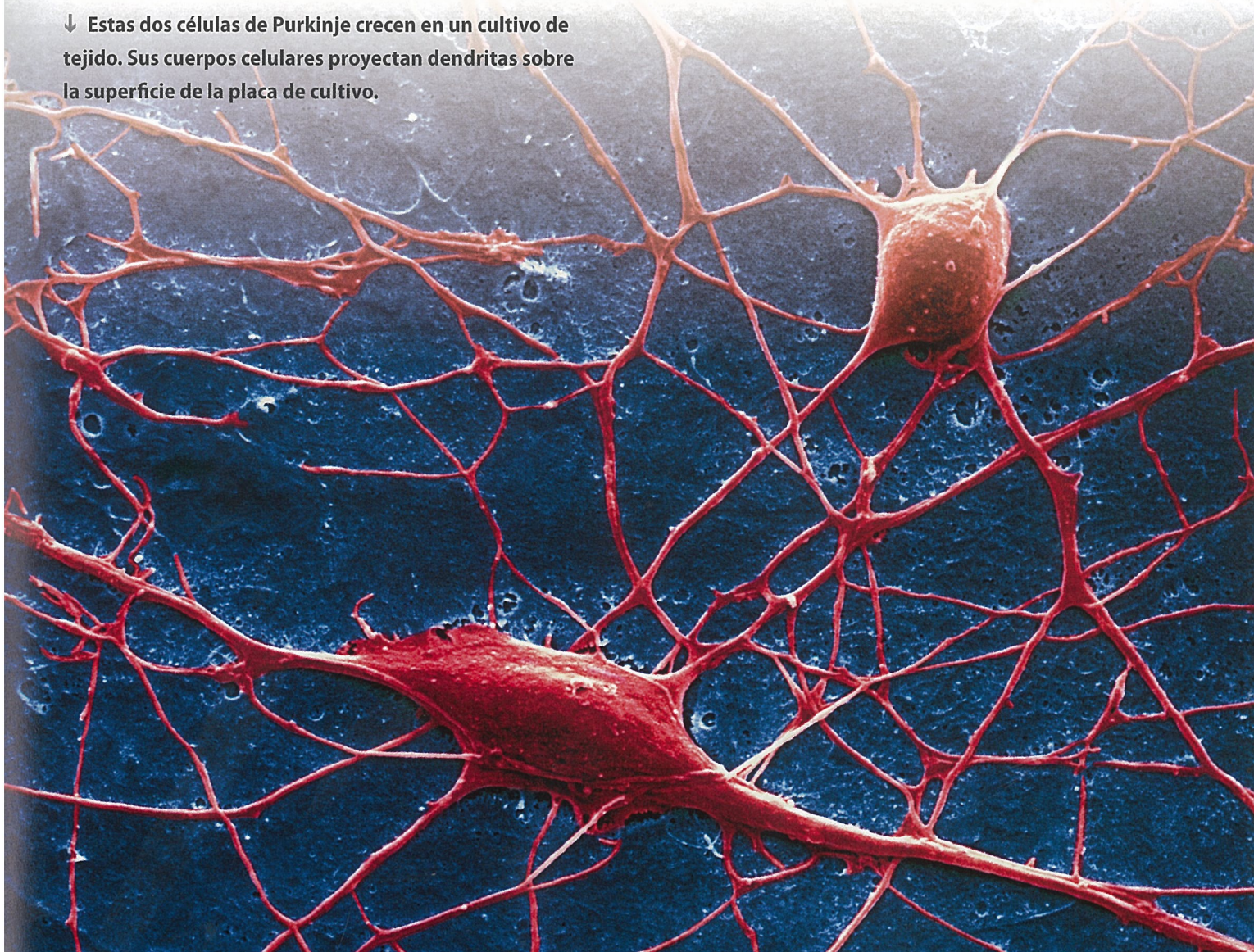
Transformación de estímulos del mundo físico en señales nerviosas

Los fotorreceptores de la retina son neuronas tan especializadas que responden al impacto de paquetes de luz (fotones): convierten este impacto en señales eléctricas (transducción fotónica) que finalmente serán interpretadas en el cerebro como información visual. Otras neuronas sensoriales del oído interno están especializadas en transducción mecánica, que es el proceso de convertir la distorsión mecánica de finos pelos que se hallan en el borde de la célula –tal como ocurre cuando una onda de presión en el oído interno se mueve a través de la célula– en señales eléctricas que se pueden enviar al cerebro para ser interpretadas como sonido.



↑ **Los fotorreceptores de la retina ocular convierten la información de fotones de luz en señales eléctricas.**

↓ **Estas dos células de Purkinje crecen en un cultivo de tejido. Sus cuerpos celulares proyectan dendritas sobre la superficie de la placa de cultivo.**



Las células gliales

Además de las neuronas, el otro gran grupo de células del sistema nervioso es la glía. Las células gliales constituyen el tejido conectivo del SN que ayudan a transportar nutrientes y a que las neuronas crezcan y funcionen apropiadamente; además las protegen de agentes patógenos.

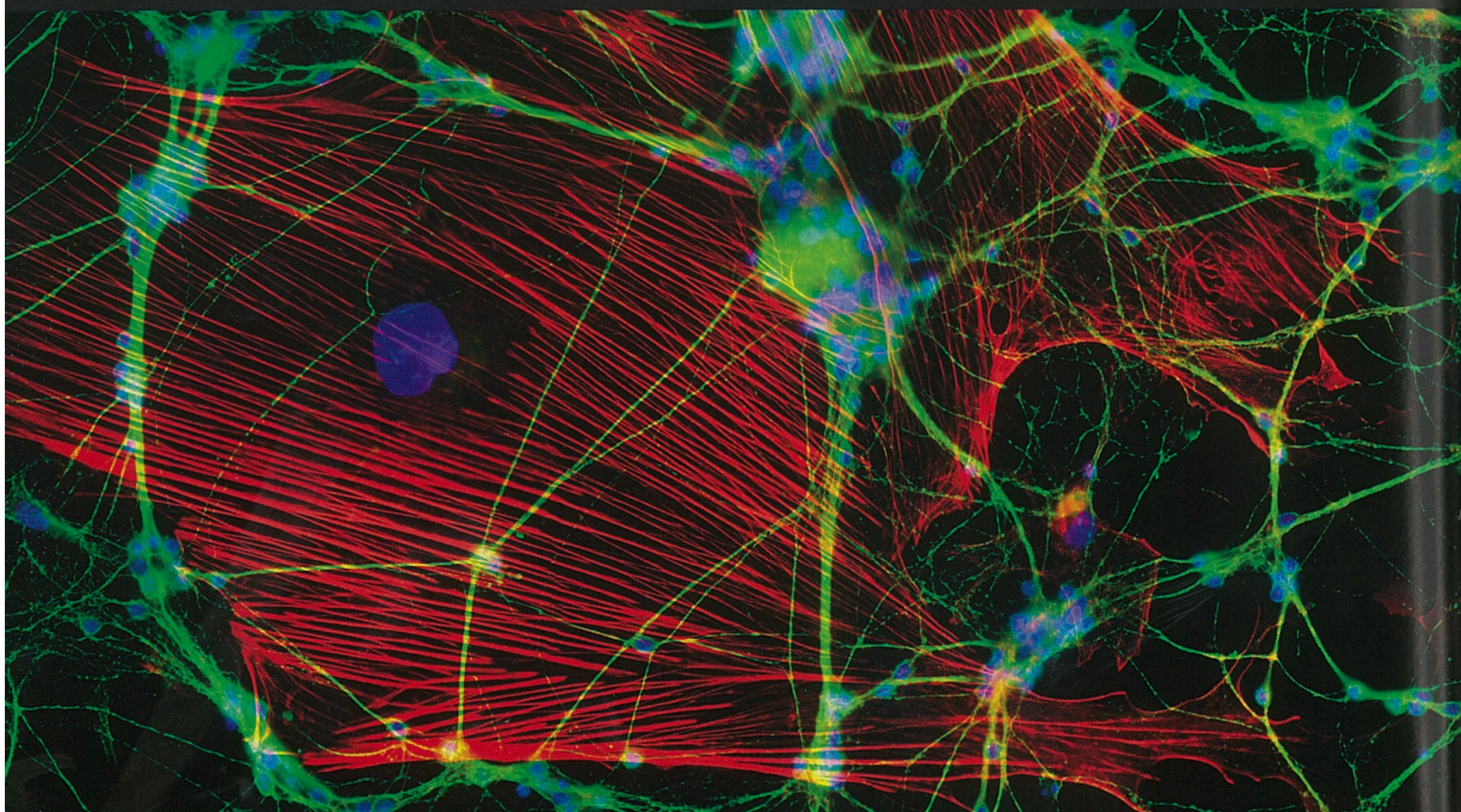
Las células gliales reciben su nombre del griego glue ("pegamento"), porque los primeros neurocientíficos imaginaron que formaban un adhesivo para mantener juntas a las neuronas. La glía realiza una importante contribución al sostener el tejido nervioso central y ejercer la misma función que el tejido conectivo de otras partes del cuerpo, pero tiene también muchas otras funciones.

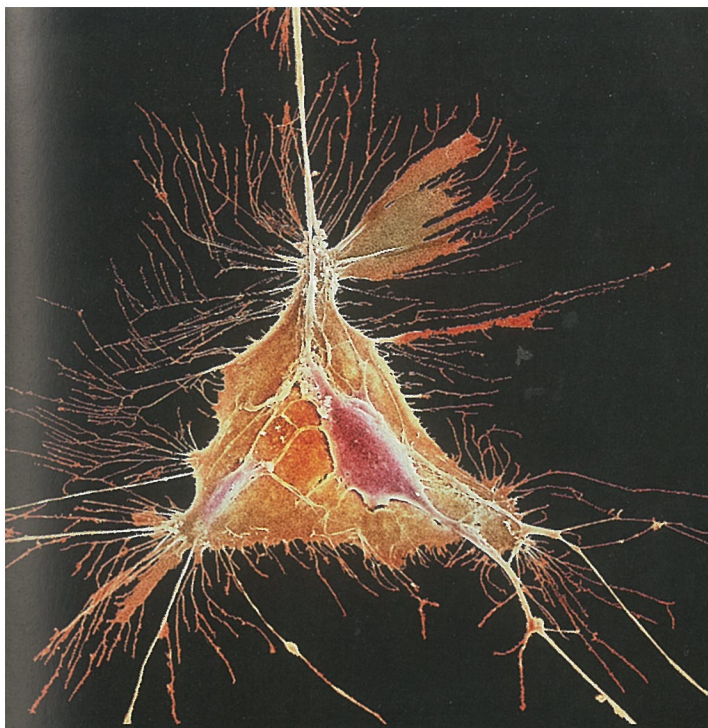
La cantidad de glía es casi tan numerosa como las neuronas. Los tres principales tipos de células gliales son: astrocitos, oligodendrocitos y microglía.

↓ **Las células gliales como éstas constituyen 50 % del volumen del encéfalo y la médula espinal.**

Astrocitos

Existen dos tipos diferentes de estas células en forma de estrella: astrocitos fibrosos, que se hallan en la materia blanca, y astrocitos protoplásmicos, en la materia gris. Ambos tienen procesos celulares que terminan en expansiones llamadas pies terminales, los cuales rodean los capilares del encéfalo y de la piamadre para controlar las concentraciones de iones en el líquido tisular y la transferencia de sustancias a través de los espacios tisulares. Otros pies terminales cubren las dendritas y los cuerpos neuronales, así como las superficies de axones que no están cubiertas con mielina. Estos últimos contactos permiten a los astrocitos controlar la concentración de iones (sodio y





← Los oligodendrocitos, como el que aquí se muestra, forman las capas de mielina alrededor de las fibras nerviosas en el sistema nervioso central.

Las partes axónicas no cubiertas por los procesos de los oligodendrocitos se ponen en contacto con los pies terminales de los astrocitos.

Microglia

Las células de la microglia son más pequeñas que las otras glías y ejercen una acción protectora inmunológica en el encéfalo y la médula espinal. Su función principal es comerse los desechos (fagocitosis) y presentar las moléculas extrañas a otras células del sistema inmunitario para inducir una respuesta inmunológica. Cuando las neuronas mueren durante el desarrollo o tras una enfermedad o lesión, la microglia limpia los restos celulares. La microglia también produce moléculas que atraen a otras células inmunológicas, tales como leucocitos, para que entren en el cerebro y se inicie una respuesta inmunológica.

La actividad de la microglia aumenta en cerebros de pacientes infectados con el VIH-1. Este virus no afecta directamente a las neuronas pero hace que la microglia produzca moléculas tóxicas llamadas citocinas, que dañan a las células nerviosas. El daño resultante causa pérdida neuronal y demencia.

cloro) en el entorno de los axones, en donde ocurren los impulsos nerviosos (potenciales de acción). Los astrocitos también forman cicatrices densas en tejido cerebral posterior a lesiones.

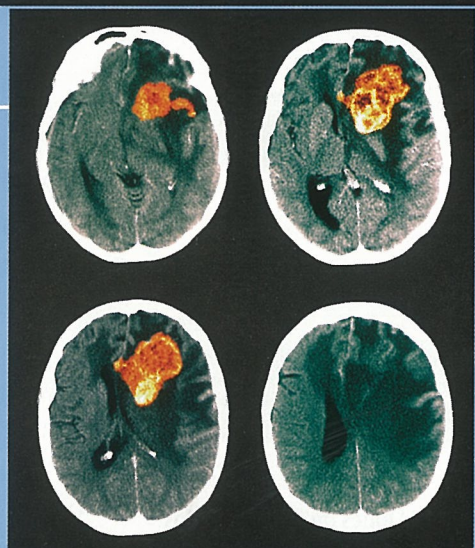
Oligodendrocitos

Los oligodendrocitos tienen la vital función de formar capas de mielina alrededor de los axones del SNC. La cubierta de mielina aísla al axón y hace que el transporte de los impulsos eléctricos sea más rápido y seguro. Un solo oligodendrocito puede formar capas de mielina alrededor de muchos axones diferentes al enrollar repetidamente sus procesos en cada axón.

El problema con la glía

Las células gliales conservan la capacidad de dividirse, a diferencia de las neuronas. Esto tiene su riesgo, porque la glía y sus precursores pueden dar origen a tumores cerebrales muy agresivos. Otro problema se relaciona con la reparación del SN. Cuando el encéfalo o la médula espinal se lesionan, las células gliales se movilizan para limpiar los desechos y dejan una cicatriz que sella la lesión, pero que también puede interferir con el recrecimiento de los axones.

→ La mancha anaranjada en ambas tomografías son de un tumor maligno de las células gliales o glioblastoma.



Cómo funcionan las neuronas

La tarea fundamental de las neuronas es procesar y comunicar información. Un fragmento del procesamiento de la información se logra a nivel de la neurona individual, pero la mayor parte del proceso requiere la acción conjunta de redes neuronales.

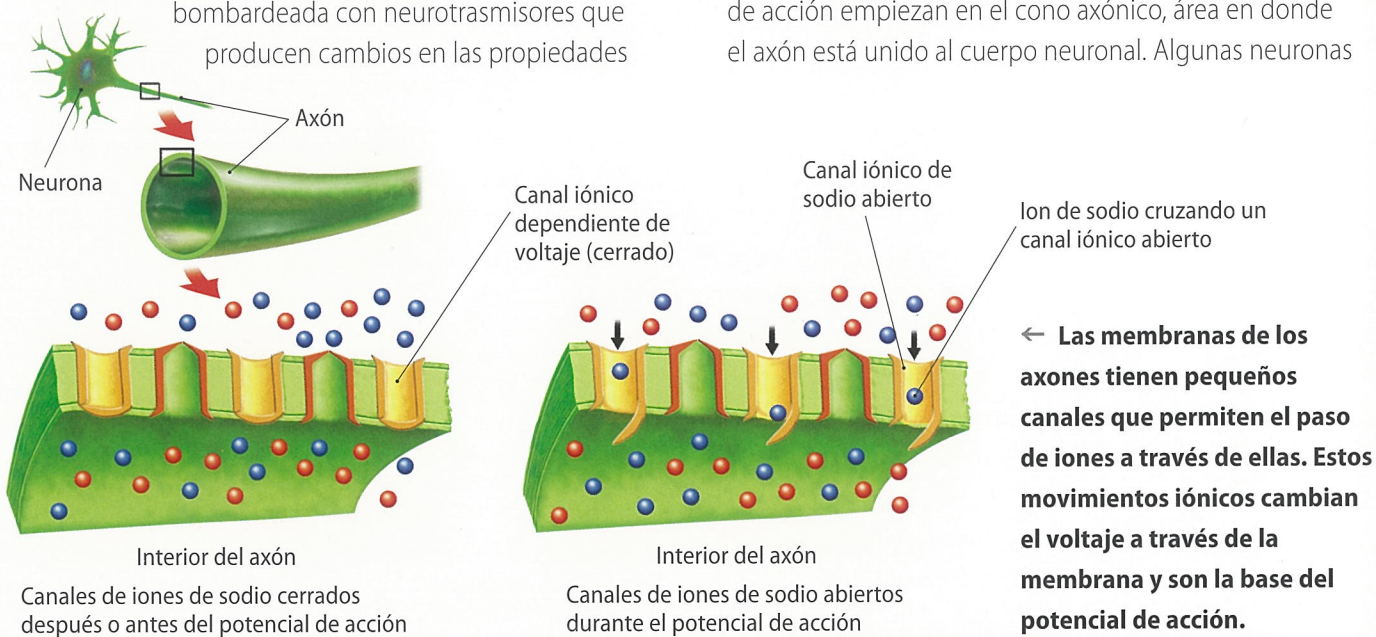
Las neuronas realizan el procesamiento de información en parte por el envío de impulsos eléctricos a través de sus prolongaciones. Estos impulsos se pueden propagar de dos formas: pasivamente, esto es, sin cambio activo alguno en los canales de la membrana neuronal que permitan el movimiento de partículas cargadas (átomos de sodio o potasio cargados positivamente) a través de la membrana; o activamente, por activación de un cambio de "todo o nada" en las propiedades eléctricas de la membrana, que deben ejecutarse hasta su finalización.

¿Activo o pasivo?

La propagación pasiva o electrotonica de la señal eléctrica se observa más en las dendritas. Las dendritas de una sola neurona pueden establecer miles de sinapsis (uniones nerviosas). Cada sinapsis es un sitio en donde la membrana de la célula nerviosa es bombardeada con neurotransmisores que producen cambios en las propiedades

eléctricas de la membrana dendrítica por la apertura de canales en la membrana neuronal y el paso de partículas cargadas a través de ésta. La activación de cada uno de estos sitios crea un campo eléctrico que se propaga del árbol dendrítico al cuerpo celular. La suma de la propagación de todos estos campos eléctricos de miles de sitios sinápticos influye en la actividad eléctrica total de la neurona en el cuerpo celular. Tanto la forma del árbol dendrítico como las posiciones relativas de diferentes tipos de sinapsis (excitatorias, aumentan la actividad; inhibitorias, disminuyen la actividad) influyen en la actividad neuronal como un todo. Este es un mecanismo por el cual ocurre la toma de decisiones en las redes nerviosas.

La propagación activa de una señal eléctrica se llama potencial de acción o impulso nervioso: es la difusión de una onda eléctrica a lo largo del axón. Los potenciales de acción empiezan en el cono axónico, área en donde el axón está unido al cuerpo neuronal. Algunas neuronas





↑ **Una capa de mielina de un axón (coloreada de rosa en esta micrografía) es una cubierta aislante que permite la conducción rápida y efectiva de impulsos nerviosos.**

generan potenciales de acción continuamente (tónicamente activas), mientras que otras lo hacen sólo cuando reciben estímulos (fásicamente activas). Independientemente del tipo que sea, la posibilidad de que una neurona produzca un potencial de acción está fuertemente influida por las fuerzas de los campos eléctricos difundidos pasivamente, generados en el árbol dendrítico por señales sinápticas de otras neuronas.

Cómo se genera un potencial de acción

El inicio de un potencial de acción depende de la apertura de pequeños canales en la membrana neuronal, que permita la entrada de átomos de sodio. Esto cambia el voltaje de la membrana (repolarización) y va seguido unos milisegundos después por la apertura de canales que permiten salir de la célula átomos de potasio, para regresar el voltaje a lo normal (poshiperpolarización).

El punto importante es que la despolarización en una parte del axón (usualmente el cono axónico) induce corrientes alrededor de éste que activan los canales de sodio en el siguiente segmento, difundiéndose así la onda de despolarización a lo largo del axón, como un potencial de acción. Los axones pueden realizar este

Los axones más veloces

Las fibras nerviosas más gruesas y mielinizadas son aquellas que llevan información del estiramiento muscular (propiocepción) o que controlan los músculos de movimiento voluntario. Esto se debe a que el control preciso del movimiento voluntario (p. ej., correr, brincar o bailar) requiere un rápido flujo de información, más que ningún otro sistema corporal. Las fibras para el dolor tienen una conducción más lenta.

proceso cientos de miles de veces por segundo y la información es usualmente enviada el número de veces por segundo que un potencial de acción se activa. Así, un fuerte estímulo doloroso provoca muchos más potenciales de acción por segundo que un estímulo doloroso débil.

Velocidad de los impulsos con la mielina

Debido a que la información se transmite en forma de impulsos nerviosos, se puede esperar que la conducción más veloz permita al sistema nervioso hacer su trabajo más rápidamente. La velocidad de un potencial de acción depende del diámetro del axón (cuanto más grueso es el axón, más rápida es la conducción) y si está envuelto en capas de mielina. Un axón sin cubierta de mielina (p. ej., algunas fibras para el dolor) puede transmitir impulsos nerviosos a una velocidad de 50 cm por segundo, pero si el axón está rodeado de mielina la velocidad alcanza hasta 100 m/s.

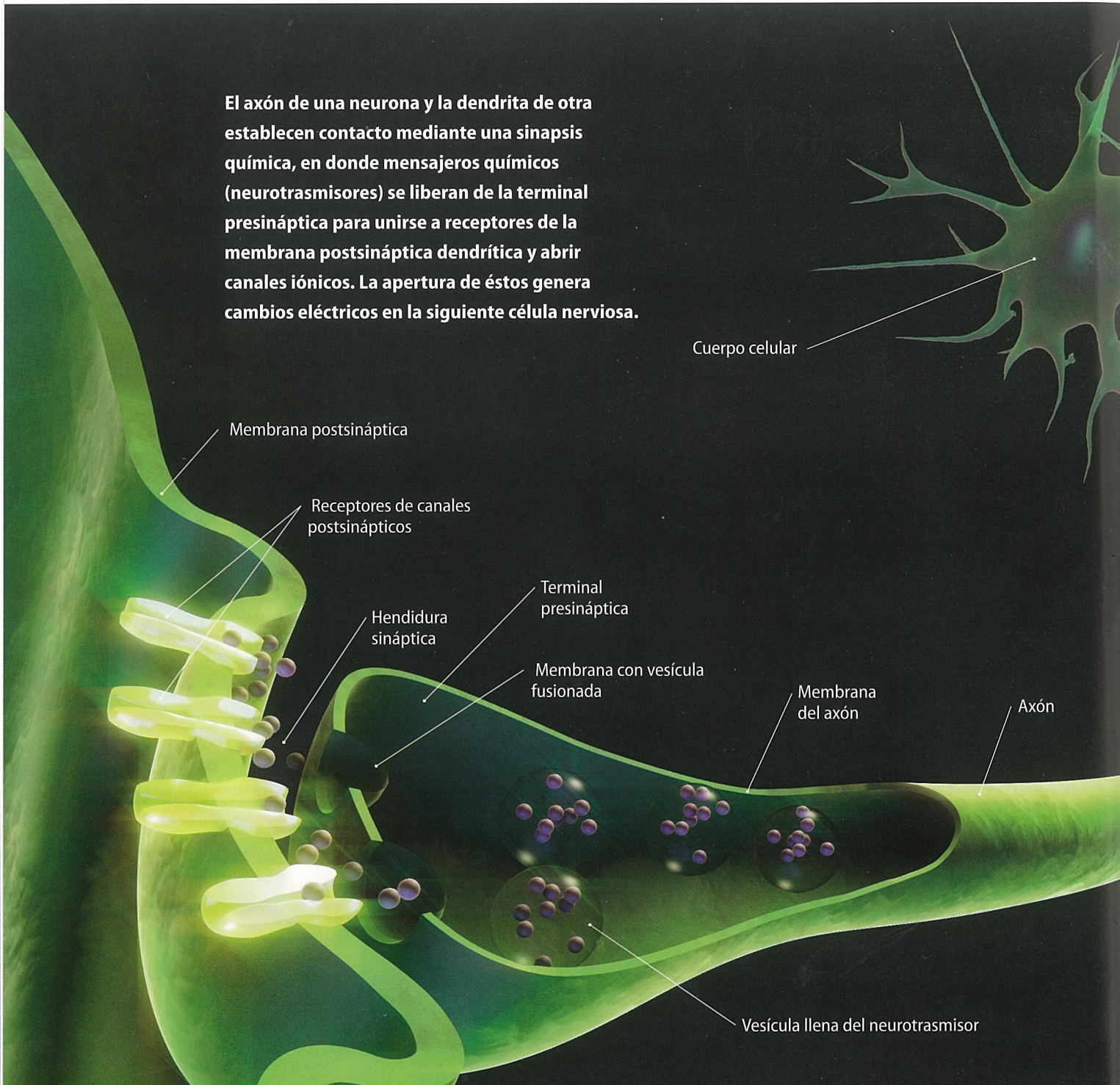
La capa de mielina se puede comparar con el material aislante que rodea a un cable eléctrico, pero la analogía es incompleta: la capa de mielina no es una cubierta continua a lo largo del axón sino una serie de capas con espacios interpuestos (nódulos de Ranvier). En un axón mielinizado, el impulso nervioso avanza y causa despolarización sólo en los nódulos de Ranvier. Esta activación a saltos se llama conducción saltatoria y es mucho más rápida que la activación de cada parte del axón.

Sinapsis química

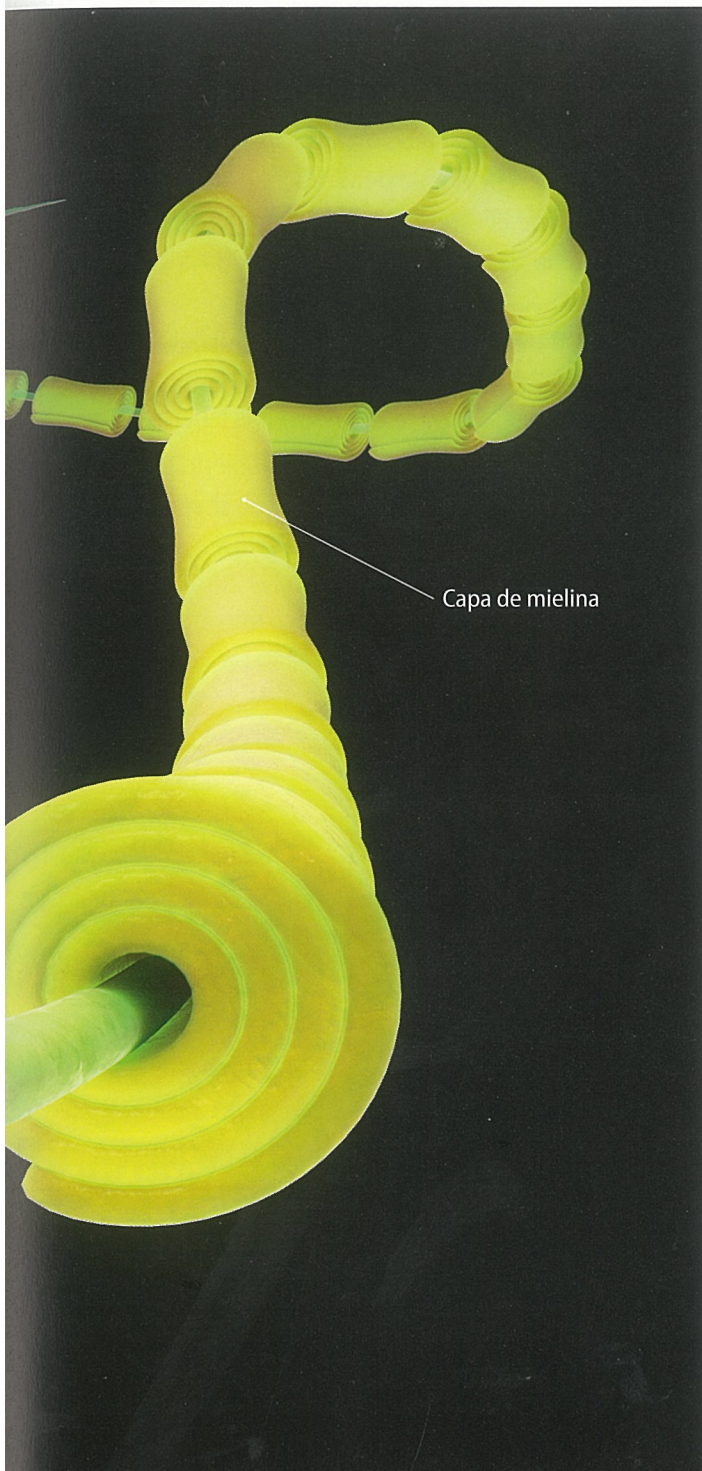
Hemos visto cómo las señales surgen y viajan a lo largo de los axones de neuronas individuales, pero, ¿cómo se comunican las neuronas entre sí? La mayoría de ellas lo hacen mediante sinapsis químicas, en donde se utilizan sustancias especiales llamadas neurotransmisores, los cuales se almacenan en pequeñas vesículas sinápticas en los botones terminales del axón y se liberan a

demanda para actuar sobre las membranas de otras neuronas. Los neurotransmisores se liberan usualmente en un minúsculo espacio llamado hendidura sináptica, ubicado entre la membrana del axón terminal de una neurona (membrana presináptica) y la membrana de las dendritas, cuerpo celular o incluso el axón de otra neurona (membrana postsináptica). La hendidura sináptica mide menos de la milésima parte del diámetro

El axón de una neurona y la dendrita de otra establecen contacto mediante una sinapsis química, en donde mensajeros químicos (neurotransmisores) se liberan de la terminal presináptica para unirse a receptores de la membrana postsináptica dendrítica y abrir canales iónicos. La apertura de éstos genera cambios eléctricos en la siguiente célula nerviosa.



de un cabello, y las sustancias liberadas en ella se unen a estructuras complejas de la membrana neuronal, llamadas receptores. Cuando un neurotransmisor de un receptor se inician cambios en la conductancia de la membrana a diferentes iones (p. ej., sodio, potasio o cloro). Estos cambios, a su vez, causan modificaciones en las propiedades eléctricas de la célula nerviosa.



Limpieza de las sinapsis

Un neurotransmisor que se ha liberado en la hendidura sináptica debe eliminarse para evitar una permanente activación de los receptores. Si nunca se elimina el neurotransmisor, permanecerá unido a los receptores, mantendrá abiertos los canales iónicos de la célula estimulada y la agotará. La eliminación se logra mediante la recaptación del neurotransmisor por parte del axón que lo produjo, difusión fuera de la hendidura o rompimiento del neurotransmisor en componentes inactivos. Algunos fármacos actúan en este proceso. Un grupo de antidepresivos, los ISRS, aumentan la disponibilidad de serotonina en la corteza cerebral al disminuir la recaptación de serotonina en las sinapsis. La disponibilidad de serotonina en la hendidura sináptica mejora el estado de ánimo.

Sinapsis eléctricas

Algunas neuronas se comunican entre sí mediante sinapsis eléctricas –sitios en donde la membrana celular de una neurona está en estrecho contacto con la de otra, sin que intervenga una hendidura. Moléculas proteínicas especiales, llamadas conexinas, unen a las membranas, de manera que la actividad eléctrica de una neurona se puede transferir directamente a la otra. Este tipo de sinapsis se observan en un grupo de neuronas de la retina ocular (células horizontales) y durante el desarrollo, cuando las células requieren compartir información para regular procesos del crecimiento.

Las sinapsis eléctricas tienen la ventaja de que permiten la transferencia directa de una señal, de una neurona a otra, sin tardanza, pero su uso en el sistema nervioso humano es relativamente raro. Esto es porque la unión de las células nerviosas mediante sinapsis eléctricas las convierten en una sola unidad eléctrica. En los mamíferos, el sistema nervioso prefiere conservar neuronas independientes pero comunicadas mediante sinapsis. La transmisión química entre células nerviosas les permite a cada una realizar una tarea diferente.