

Elementos fundamentales del sistema nervioso

Más que cualquier otro órgano, es el sistema nervioso lo que hace que los seres humanos seamos especiales. El sistema nervioso central (SNC) humano, más pequeño y con menor peso que la mayoría de las computadoras de escritorio, es el instrumento de computación más complejo y elegante que existe. Recibe e interpreta una inmensa diversidad de informaciones sensoriales, controla una variedad de comportamientos motores simples y complejos, y utiliza lógica deductiva e inductiva. El cerebro puede tomar decisiones complejas, pensar en forma creativa y sentir emociones. Es capaz de *generalizar* y posee una refinada capacidad para reconocer que no puede ser reproducido incluso por las computadoras centrales más avanzadas. Por ejemplo, el sistema nervioso humano puede identificar de inmediato un rostro familiar, sin importar el ángulo en el que se presente, puede llevar a cabo muchas tareas demandantes en forma casi simultánea.

En vista de la complejidad del sistema nervioso y la riqueza de sus acciones, uno podría preguntarse si alguna vez llegaría a comprenderse. De hecho, la neurociencia ha comenzado a proporcionar un entendimiento, en refinado detalle, de la organización y psicología del sistema nervioso y de las alteraciones en su funcionamiento que ocurren en diversas enfermedades.

Esta comprensión tiene una base firme en una concepción de la *estructura* de este sistema y de la interrelación entre estructura y función.

La complejidad de las acciones del sistema nervioso es el reflejo de una estructura rica y compleja; en cierto sentido, *puede* concebirse como una red compleja y dinámica de computadoras entrelazadas. No obstante, la anatomía del sistema nervioso se puede entender con facilidad. La comprensión de la neuroanatomía es obviamente relevante tanto para la neurociencia básica como para la medicina clínica. La neuroanatomía clínica (es decir, la estructura del sistema nervioso, considerada en el contexto de los trastornos de este sistema) puede enseñarnos importantes lecciones acerca de la estructura y organización del sistema nervioso normal y es esencial para comprender los trastornos de dicho sistema.

PLAN GENERAL DEL SISTEMA NERVIOSO

Divisiones principales

A. Anatomía

En un sentido anatómico, el sistema nervioso humano es un complejo con dos subdivisiones.

1. SNC—El SNC, que incluye al encéfalo o cerebro y a la médula espinal, está rodeado por hueso y envuelto en capas protectoras (meninges) y espacios llenos de líquido.

2. Sistema nervioso periférico (SNP)—El SNP está formado por los nervios craneales y espinales (figura 1-1).

B. Fisiología

En sentido funcional, el sistema nervioso se divide en dos sistemas.

1. Sistema nervioso somático—Inerva las estructuras de las paredes del cuerpo (músculo, piel y membranas mucosas).

2. Sistema nervioso autónomo (visceral) (SNA)—El SNA contiene porciones de los sistemas central y periférico. Controla las actividades de los músculos lisos y glándulas de los órganos internos (vísceras) y los vasos sanguíneos y envía la información sensorial al encéfalo.

Unidades estructurales y organización general

La porción central del sistema nervioso consiste en el **encéfalo** y la **médula espinal** extendida (figura 1-2 y cuadro 1-1). El encéfalo tiene una estructura escalonada y, desde un punto de vista general, se puede subdividir en encéfalo, tronco encefálico y cerebelo.

La mayor parte del sistema nervioso (cerebro o prosencéfalo) es la más avanzada en términos filogenéticos y es responsable

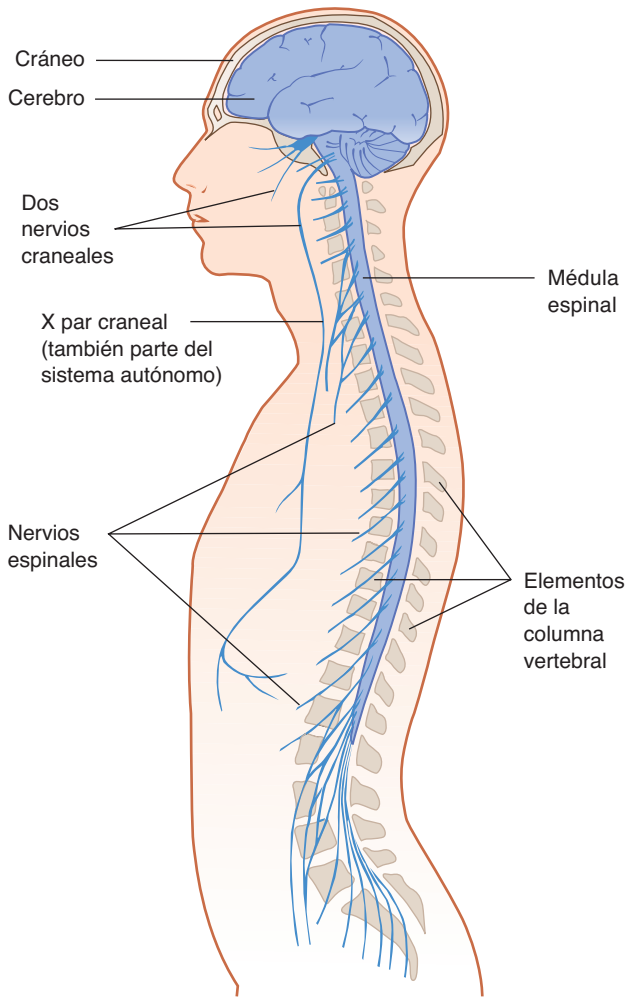


FIGURA 1-1 Estructura del sistema nervioso central y del sistema nervioso periférico donde se muestra la relación entre el sistema nervioso central y su envoltura ósea.

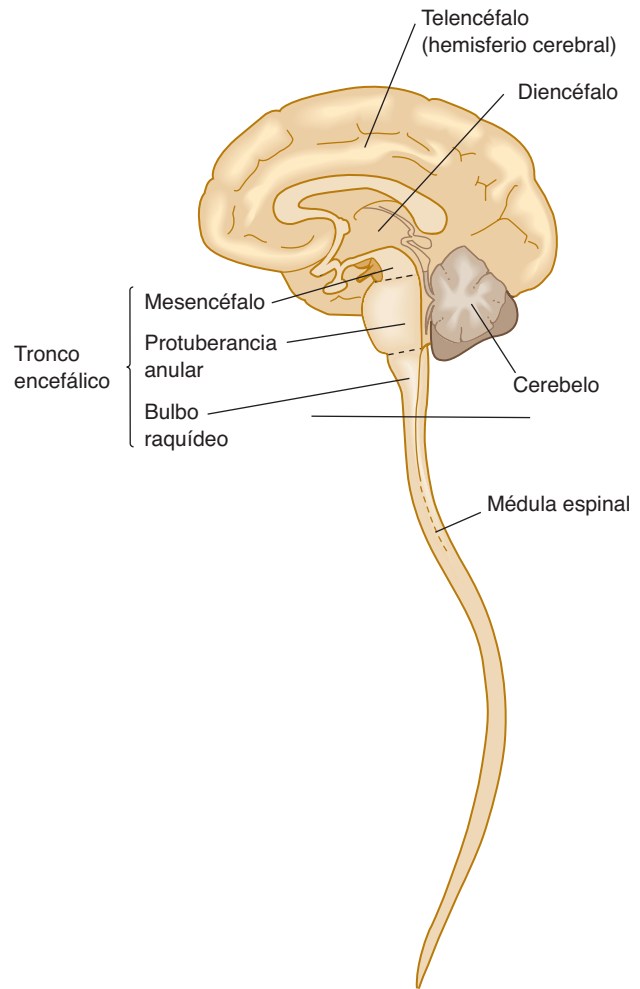


FIGURA 1-2 Las dos divisiones principales del sistema nervioso central, el cerebro y la médula espinal, vistos desde el plano sagital medio.

de las funciones más complejas (p. ej., cognición). En un sentido más caudal, el tronco encefálico, bulbo raquídeo y médula espinal cumplen con funciones menos avanzadas, pero esenciales.

El **cerebro (prosencefalo)** incluye al **telencéfalo** y al **diencefalo**; el telencéfalo incluye a la corteza cerebral (la parte más evolucionada del encéfalo, llamada a veces “sustancia gris”), la sustancia blanca subcortical y los ganglios basales, que son masas grises profundas dentro de los hemisferios cerebrales. La **sustancia blanca** lleva ese nombre debido a que, en un cerebro recién seccionado, tiene una apariencia brillante como resultado de su mielina sumamente rica en lípidos; la sustancia blanca consiste en fibras mielinizadas y no incluye cuerpos de las células neuronales o sinapsis (figura 1-3). Las principales subdivisiones del diencefalo son el tálamo y el hipotálamo. El **tronco encefálico** consiste en el **cerebro medio (mesencéfalo)**, **protuberancia anular** y **bulbo raquídeo**. El **cerebelo** incluye al vermis y a dos lóbulos laterales. El encéfalo, que es hueco, contiene un sistema de espacios llamados **ventrículos**; la médula espinal tiene un canal central estrecho que se cierra en gran medida en la adultez. Estos espacios están llenos de líquido cefalorraquídeo (LCR) (figuras 1-4 y 1-5; véase también capítulo 11).

Unidades funcionales

El cerebro, que representa aproximadamente 2% del peso corporal, contiene muchos miles de millones (quizá incluso billones) de neuronas y células gliales (véase capítulo 2). Las **neuronas**, o células nerviosas, son células especializadas que reciben y envían señales a otras células a través de sus extensiones (fibras nerviosas o **axones**). La información se procesa y codifica en una secuencia de pasos eléctricos o químicos que ocurren, en la mayoría de los casos, a gran velocidad (en milisegundos). Muchas neuronas tienen cuerpos relativamente grandes y largos axones que transmiten los impulsos rápidamente a lo largo de una distancia considerable. Por otra parte, las interneuronas tienen pequeños cuerpos celulares y axones cortos, y transmiten los impulsos en forma local. Las células nerviosas que cumplen con una función común, a menudo con una meta común, frecuentemente se agrupan juntas en **núcleos**. Las células nerviosas con una forma, función y conexiones comunes, y que están agrupadas juntas fuera del SNC, se denominan **ganglios**.

Otros elementos celulares que sustentan la actividad de las neuronas son las **células gliales**, de las cuales existen varios tipos. Las células gliales dentro del cerebro y de la médula espinal superan en número a las neuronas en una proporción de 10:1.

CUADRO 1-1 Principales divisiones del sistema nervioso central.

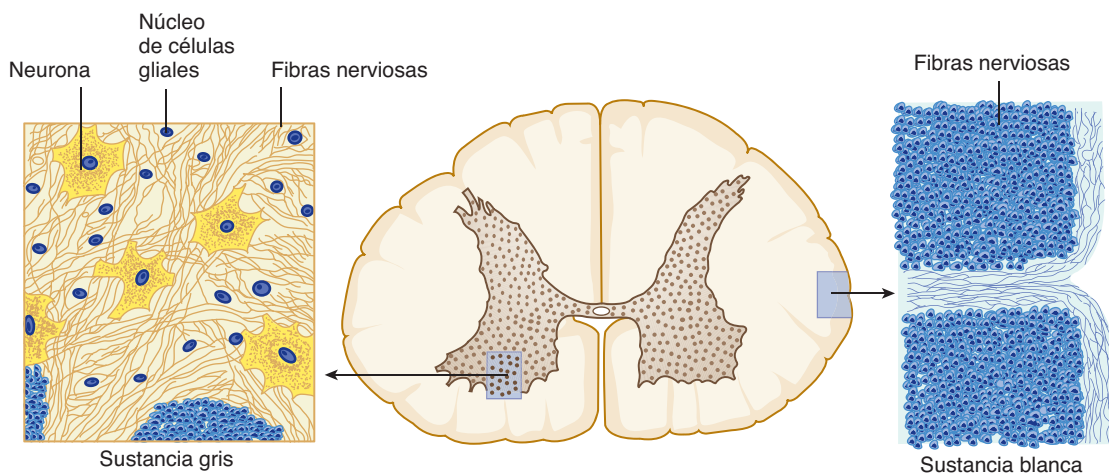
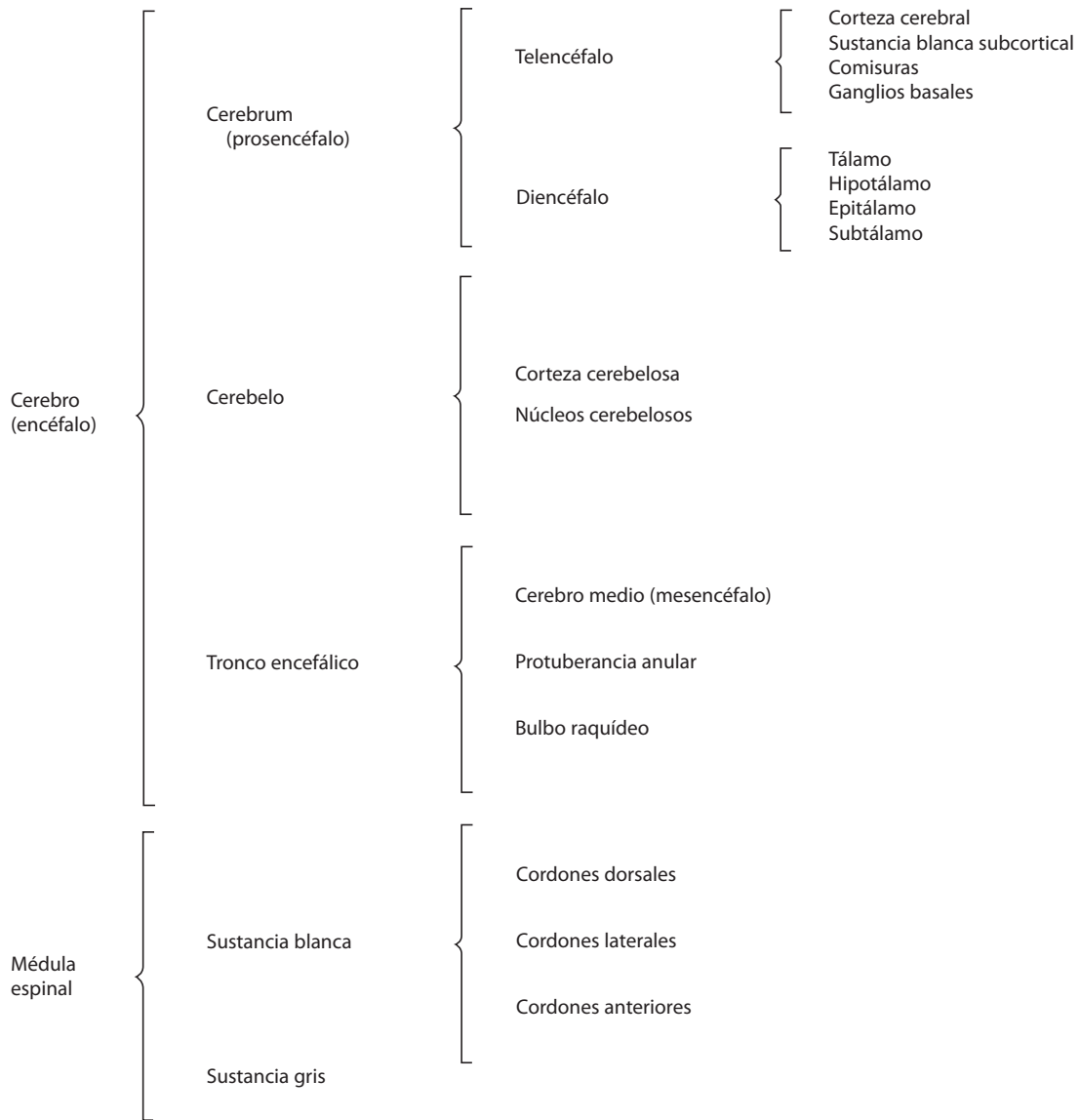


FIGURA 1-3 Corte transversal de la médula espinal donde se muestra la sustancia gris (que contiene los cuerpos neuronales y de células gliales, axones, dendritas y sinapsis) y sustancia blanca (que contiene los axones mielinizados y las células gliales asociadas). (Reproducida, con autorización, de Junqueira LC, Carneiro J, Kelley RO: *Basic Histology: Text & Atlas*, 11th ed. McGraw-Hill, 2005.)

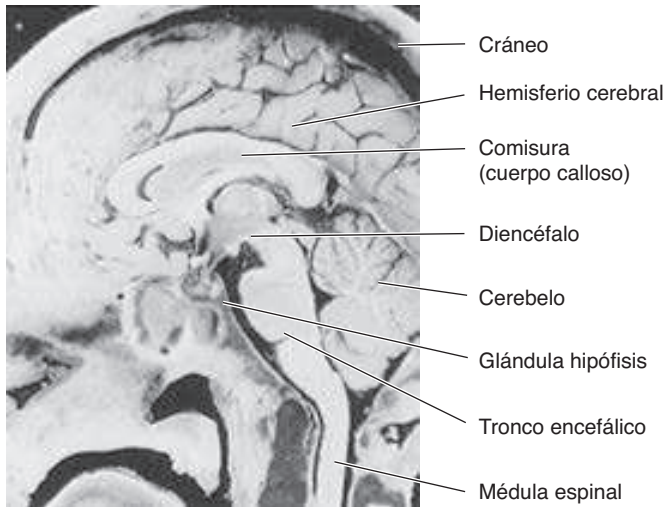


FIGURA 1-4 Fotografía de un corte sagital medio a través de la cabeza y parte superior del cuello donde se muestran las principales divisiones del sistema nervioso central. (Reproducida, con autorización, de deGroot J: *Correlative Neuroanatomy of Computed Tomography and Magnetic Resonance Imagery*, 21ª ed. Appleton & Lange, 1991.)

Cómputo en el sistema nervioso

Las células nerviosas transmiten señales entre sí en las **sinapsis** (véanse capítulos 2 y 3). Los transmisores químicos se asocian con la función de la sinapsis: excitación e inhibición. Una neurona puede recibir miles de sinapsis, que le llevan información de muchas fuentes. Al integrar la alimentación excitatoria e inhibitoria que proviene de estas diversas fuentes y producir su propio mensaje, cada neurona actúa como un dispositivo de procesamiento de información.

Algunos comportamientos muy primitivos (p. ej., la contracción refleja e inconsciente de los músculos alrededor de la rodilla en respuesta a la percusión del tendón de la rótula) están mediados por una cadena **monosináptica** simple de dos neuronas conectadas por una **sinapsis**. Por el contrario, las conductas más complejas requieren circuitos neurales **polisinápticos** más grandes en los que participan muchas neuronas interconectadas por sinapsis.

Tractos y comisuras

Las conexiones, o vías, entre grupos de neuronas en el SNC están en forma de haces de fibras, o tractos (**fascículos**). Los agrupamientos de tractos, como se observa en la médula espinal, se conocen como **cordones (funículos)**. Los tractos pueden descender (p. ej., del cerebro al tronco encefálico o médula espinal) o ascender (p. ej., de la médula espinal al cerebro). Estas vías son conexiones verticales que en su curso pueden cruzarse (**decusar**) de un lado del SNC al otro. Las conexiones horizontales (laterales) se denominan **comisuras**.

Múltiples tractos conectan muchas partes del sistema nervioso. Por ejemplo, una diversidad de tractos ascendentes y descendentes conectan al SNP y los centros espinales inferiores con el cerebro. Esto refleja el hecho de que el sistema nervioso extrae diferentes aspectos de su entorno sensorial (p. ej., la forma, peso y temperatura de un objeto que toca el cuerpo) y los codifica en forma independiente y controla aspectos específicos de la conducta

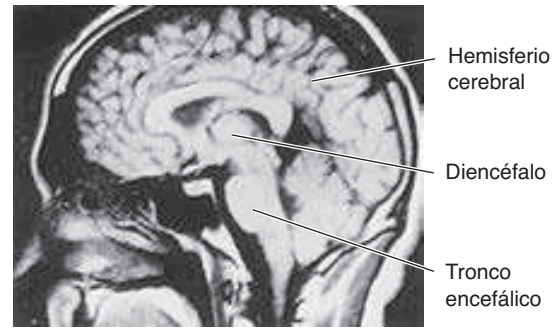


FIGURA 1-5 Imagen por resonancia magnética de un corte sagital medio a través de la cabeza (secuencia rápida; véase capítulo 22). Compárese con la figura 1-2.

motora (postura, tono muscular, movimientos delicados) utilizando diferentes conjuntos de neuronas. La multiplicidad de tractos también dota al sistema nervioso de un grado de **redundancia**: después de la destrucción parcial del sistema nervioso, sólo se perderán algunas funciones; es posible que otras se conserven, incrementando la probabilidad de que el organismo sobreviva.

Simetría del sistema nervioso

Un tema general en neuroanatomía es que, en un primer acercamiento, el sistema nervioso está construido con **simetría bilateral**. Esto es más evidente en el cerebro y el cerebelo, que se organizan en **hemisferios** derecho e izquierdo. Al observarlos inicialmente, estos hemisferios parecen simétricos. Algunas funciones corticales superiores, como el lenguaje, tienen una mayor representación en un hemisferio que en el otro, pero en términos generales, los hemisferios tienen una estructura similar. Incluso en las estructuras más caudales, como en el tronco encefálico y la médula espinal que no se organizan en hemisferios, existe simetría bilateral.

Representación cruzada

Otro tema general en la construcción del sistema nervioso es la **decusación y representación cruzada**: el lado derecho del cerebro recibe información y controla el funcionamiento motor relacionado con el lado izquierdo del mundo y viceversa. La información visual del lado derecho del mundo se procesa en la corteza visual del hemisferio izquierdo. De manera similar, la sensación de tacto, de calor o frío y el sentido de posición de las articulaciones del lado derecho del cuerpo se procesan en la corteza somatosensorial del hemisferio cerebral izquierdo. En cuanto al control motor, la corteza motora del hemisferio cerebral izquierdo controla los movimientos corporales que atañen al lado derecho del mundo exterior. Esto incluye, por supuesto, el control de los músculos del brazo y pierna derechos, como bíceps, tríceps, músculos de la mano y gastrocnemio. Existen excepciones ocasionales para este patrón de “inervación cruzada”: por ejemplo, el músculo esternocleidomastoideo **izquierdo** está bajo el control de la corteza cerebral **izquierda**. No obstante, incluso esta excepción tiene sentido funcional: como resultado de su biomecánica poco común, la contracción del esternocleidomastoideo izquierdo gira la cabeza hacia la **derecha**. Entonces, aun para el músculo anómalo, el control de los movimientos re-

levantes para el lado derecho del mundo se origina en el hemisferio cerebral contralateral izquierdo, como se pronosticaría según el principio de representación cruzada.

Existe una excepción importante para la regla del control motor cruzado: como resultado de la organización de las entradas y salidas de información cerebelosa, cada hemisferio cerebeloso controla la coordinación y tono muscular del lado *ipsolateral* del cuerpo (véase el capítulo 7).

Mapamundi dentro del cerebro

En cada uno de muchos niveles, el cerebro crea mapas de diversos aspectos del mundo exterior. Por ejemplo, consideremos los cordones dorsales (que transmiten información sensorial, en particular con respecto a tacto y vibración, a partir de las terminaciones sensoriales en la superficie corporal hacia arriba dentro de la médula espinal). Los axones dentro de los cordones dorsales están dispuestos de manera ordenada, con fibras provenientes de brazo, torso y pierna que forman un mapa que conserva la relación espacial de estas partes del cuerpo. Dentro de la corteza cerebral también existe un mapa sensorial (que tiene la forma de un pequeño hombre y que, por ende, se denomina homúnculo) dentro de la corteza sensorial. Existen múltiples mapas del mundo visual dentro de los lóbulos occipitales y también dentro de los lóbulos temporales y parietales. Estos mapas se llaman retinotópicos porque conservan las relaciones geométricas entre los objetos cuya imagen se ha proyectado en la retina y, en consecuencia, proporcionan representaciones espaciales del ambiente visual dentro del cerebro. Cada mapa contiene neuronas dedicadas a extraer y analizar información sobre un aspecto particular (p. ej., forma, color o movimiento) del estímulo.

Desarrollo

Los primeros tractos de fibras nerviosas aparecen aproximadamente en el segundo mes de vida fetal; los tractos motores descendentes principales aparecen cerca del quinto mes. La **mielinización** (formación de vainas de mielina) de las fibras nerviosas de la médula espinal comienza aproximadamente a la mitad de la vida del feto; algunos tractos no se mielinizan por completo durante 20 años. Los tractos más antiguos (aquellos comunes a todos los animales) se mielinizan primero; los tractos corticoespiniales se mielinizan principalmente durante el primer y segundo año de vida.

Los axones en crecimiento se orientan a sus destinos correctos durante el desarrollo del sistema nervioso mediante **moléculas guía** extracelulares (que incluyen las **netrinas** y las **semaforinas**). Algunas de ellas actúan como atrayentes para los axones en crecimiento, guiándolos hacia un destino particular. Otras actúan como repelentes. Existen muchos tipos de moléculas guía que probablemente son cada una específica para un tipo particular de axón y se encuentran en gradientes de diversas concentraciones. En muchas partes del sistema nervioso en desarrollo, de inicio existe una superabundancia de axones jóvenes, y aquellos que no llegan a sus destinos correctos se pierden de manera subsiguiente debido a la poda.

Aunque la organización estructural del cerebro queda bien establecida antes de comenzar el funcionamiento neural, el cerebro en maduración es susceptible de modificación si se aplica o

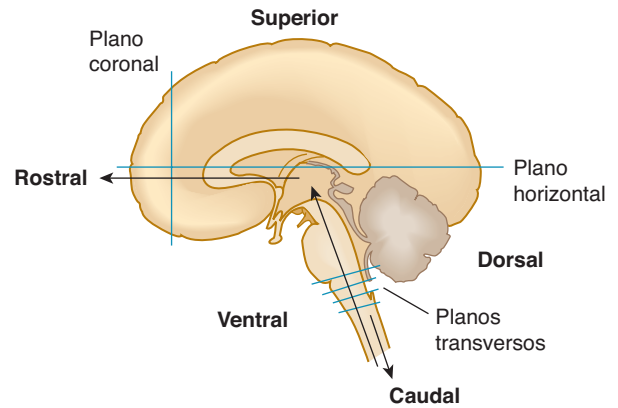


FIGURA 1-6 Planos (coronal, horizontal, transversal) y direcciones (rostral, caudal, etc.) que se emplean comúnmente en la descripción del cerebro y de la médula espinal. El plano del dibujo es sagital medio.

retiene un estímulo apropiado durante un periodo crítico, que puede durar sólo unos cuantos días o incluso menos.

SISTEMA NERVIOSO PERIFÉRICO

El **sistema nervioso periférico (SNP)** incluye los nervios espinales, nervios craneales y sus ganglios asociados (grupos de células nerviosas fuera del SNC). Los nervios contienen fibras nerviosas que conducen información hacia (aférente) o desde (eferente) el SNC. En general, las fibras **eferentes** participan en las funciones motoras, como la contracción de los músculos o la secreción de las glándulas; las fibras **aférentes** generalmente transmiten los estímulos sensoriales desde la piel, membranas mucosas y estructuras profundas.

PLANOS Y TÉRMINOS

Los neuroanatomistas tienden a considerar al cerebro y a la médula espinal en términos de cómo aparecen en rebanadas o cortes. Los planos de corte y los términos empleados en la neuroanatomía se muestran en la figura 1-6 y en el cuadro 1-2.

CUADRO 1-2 Términos usados en neuroanatomía.

Ventral, anterior	Hacia el lado frontal (vientre)
Dorsal, posterior	Hacia el lado trasero
Superior, craneal	Hacia el lado superior (cráneo)
Inferior	Hacia el lado inferior
Caudal	En la posición más baja (hacia el extremo de la cola)
Rostral	Hacia el lado delantero (hacia el extremo de la nariz)
Medial	Cerca o hacia la mitad
Mediano	En medio, plano medio (sagital medio)
Lateral	Hacia el lado (lejos del medio)
Ipsilateral	Del mismo lado
Contralateral	Del lado opuesto
Bilateral	En ambos lados

REFERENCIAS

- Brodal P: *The Central Nervous System: Structure and Function*. Oxford Univ Press, 1981.
- Damasio H: *Human Brain Anatomy in Computerized Images*. Oxford Univ Press, 1996.
- Geschwind N, Galaburda AM: *Cerebral Lateralization*. Harvard Univ Press, 1986.
- Kandel ER, Schwartz JN, Jessell T: *Principles of Neural Science*. Appleton & Lange, 2000.
- Mai J, Paxinos G, Voss T: *Atlas of the Human Brain*. Elsevier, 2007.
- Martin JH: *Neuroanatomy Text & Atlas*, 2nd ed. Appleton & Lange, 1996.
- Mazziotta J, Toga A, Frackowiak R: *Brain Mapping: The Disorders*. Elsevier, 2000.
- Netter FH: *Nervous System (Atlas and Annotations)*. Vol 1: The CIBA Collection of Medical Illustrations. CIBA Pharmaceutical Company, 1983.
- Nicholls JG, Martin AR, Wallace BG: *From Neuron to Brain*, 3rd ed. Sinauer, 1992.
- Parent A, Carpenter MC: *Carpenter's Human Neuroanatomy*, 8th ed. Williams & Wilkins, 1996.
- Romanes GJ: *Cunningham's Textbook of Anatomy*, 18th ed. Oxford Univ Press, 1986.
- Shepherd GM: *Neurobiology*, 2nd ed. Oxford Univ Press, 1994.
- Toga A, Mazziotta J: *Brain Mapping: The Systems*. Elsevier, 2000.