

Laboratorio 3 ESQUELETO AXIAL EN VERTEBRADOS MODERNOS

El esqueleto, desde el punto de vista fisiológico se considera a veces como un sistema relativamente inerte, pero desde un punto de vista funcional amplio es de importancia fundamental. Las estructuras esqueléticas duras son vitales, ya que unen y protegen los órganos blandos y permiten sostener el cuerpo y darle forma. En los vertebrados se encuentran dos tipos de tejidos esqueléticos característicos: cartílago y hueso, los cuales difieren en su naturaleza (origen) y evolución.

El esqueleto no es única estructura, sino que está dividida en elementos distintos cuya forma, estructura, función, posición y origen embrionario difieren. Una clasificación aproximada de estos elementos es: 1) esqueleto dérmico o exoesqueleto; 2) endoesqueleto, el cual está a su vez dividido en esqueleto axial y en esqueleto apendicular (Fig. 1).

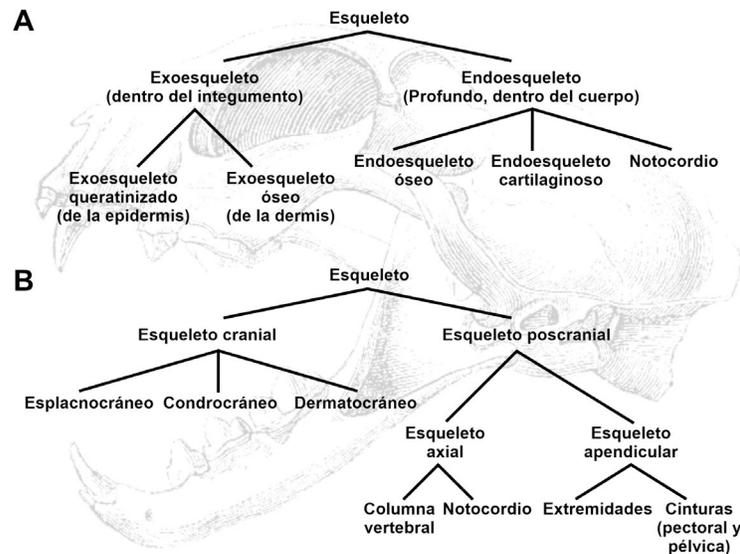


Figura 1. Organización de tejidos esqueléticos en vertebrados. Modificado de Kardong (2012¹).

El esqueleto axial y el apendicular son parte del **endoesqueleto**, y son estructuras profundas en el cuerpo de los animales que se forman a partir del cartílago embrionario. El **esqueleto axial** está conformado por los elementos que le dan forma al cuerpo y protegen los órganos internos (vísceras). La **columna vertebral**, conformada por vértebras, es la principal estructura axial que le da forma al cuerpo en el eje longitudinal. Las **costillas** conforman la caja torácica y protege las vísceras. El **esqueleto apendicular** lo conforman todos los elementos óseos que dan forma a las aletas en peces y a extremidades en los tetrápodos, y los huesos de las cinturas pectoral y pélvica, donde están articulados los huesos de las extremidades

HUESOS DEL ESQUELETO AXIAL Y APENDICULAR

1. Conocer los clados y la taxonomía descrita a continuación.
2. Identificar elementos esqueléticos de origen dermal y endocondral.
3. Usar los términos de posición para localizar los huesos respecto a la posición de otro (Fig. 2): craneal = anterior; caudal = posterior, dorsal = superior, ventral = inferior, medial; y lateral.
4. Identificar:
 - a. Especializaciones de las vértebras: regiones cervical, torácica, lumbar (en algunos taxones no se diferencia la región torácica de lumbar y se denomina todo como tronco), sacra y caudal.
 - b. Forma del centro vertebral (= *centrum*) vertebral en anamniotas (anficélico) y en amniotas (acélico, procélico y opistocélico).

¹ Kardong, K.V. 2012. Vertebrates: comparative anatomy, function, evolution. Sixth edition. McGraw-Hill, New York. 794 pp.

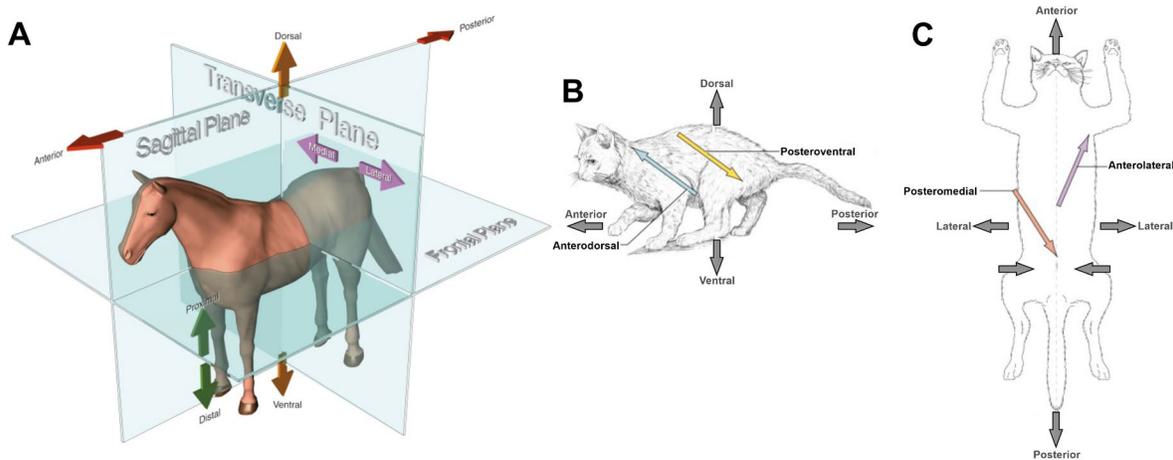


Figura 2. Planos o secciones direccionales a través del cuerpo mostrados en un caballo (A) y en un gato (B-C). Modificado de De Iuliis & Pulerà (2019²).

- c. Partes de las vértebras: centro, espina neural, procesos transversos, pre- y pos-cigapófisis, canales hemales, espinas hemales.
- d. Cinturas apendiculares: pectoral y pélvica. En peces actinoptergios derivados, su única localización en el cuerpo.
- e. Tipos de aletas mediales en peces: dorsal, anal y caudal.
- f. Formas de la aleta caudal en peces: heterocerca, dificerca y homocerca.
- g. Elementos de apoyo en las aletas de peces: pterigóforos basales y radiales, ceratotriquia, lepidotriquia y actinotriquia.
- h. Algunos de los huesos de la cintura pectoral de peces: escapulocoracoide o escápula, coracoide anterior y cleitrón.
- i. Algunos de los huesos de la cintura pectoral de anfibios: supraescápula, escápula, coracoide anterior y clavícula.
- j. Hueso de la cintura pectoral en amniótos: supraescápula, escápula, coracoide, clavícula, e interclavícula.
 - i. Partes de la escapula de mamíferos: espina escapular, proceso acromion y proceso coracoides.
- k. Huesos de la extremidad anterior: humero, radio, ulna, cárpales, metacarpales y falanges.
 - i. El proceso olecranon de la ulna.
- l. Elementos óseos de la cintura pélvica de peces y tetrápodos: placas isquiopúbicas (peces) e ilion, isquion y pubis.
- m. Huesos de extremidad posterior en tetrápodos: fémur, tibia, fibula, tarsales, metatarsales y falanges.
- n. Postura en mamíferos: plantígrada, digitígrada y ungulígrada.

ESQUELETO AXIAL

Vertebrados anamniótos (peces y anfibios)

Forma y arquitectura de las vértebras:

Los elementos del **esqueleto axial** están a lo largo del eje medio o eje sagital del cuerpo. El esqueleto axial incluye el notocordio, las vértebras, las costillas y en peces, las aletas mediales. El notocordio es un bastón cartilaginoso localizado centralmente que soporta el cuerpo de un embrión en desarrollo (Fig. 3) o también presente en lampreas (agnatos). En la mayoría de vertebrados, las vértebras reemplazan parcialmente (como en lampreas; Fig. 4) o completamente al notocordio (peces y tetrápodos). El cuerpo vertebral o centro (Fig. 5) es un disco grande y solido que amortigua las fuerzas compresivas durante el movimiento del cuerpo. Algunos centros son bicóncavos (vertebra anficélica) o planos (vertebra acélica) (Fig. 6). En peces, las vértebras anficélicas están unidas apretadamente (Fig. 7) por medio de tejido conectivo. Los anfibios también tienen vértebras anficélicas, aunque no todos los grupos. Otras vértebras tienen cavidades redondeadas (concauidad) en la región anterior (vertebra procélica; Fig. 8) o en la región posterior (vertebra opistocélica), con un correspondiente lado opuesto redondeado que se articula con la vertebra adyacente (la de atrás). Las vértebras encierran el cordón espinal con los arcos neurales (o vertebrales; Fig. 5). En la cola, el arco hemal de las vértebras caudales encierran las arterias y venas caudales. Las vértebras tienen varias áreas donde se anclan los músculos a través de procesos neurales (= espina neural), transversos (= apófisis transversas) hemales (= espina hemal) (Fig. 9). En cada una de las regiones del esqueleto axial hay diferentes elementos que se han transformado a lo largo del curso de la evolución de los vertebrados (Tabla 1).

² De Iuliis, G. & Pulerà, D. 2019. The dissection of vertebrates: a laboratory manual. Third edition. Academic Press, San Diego, CA, USA. 393 pp.

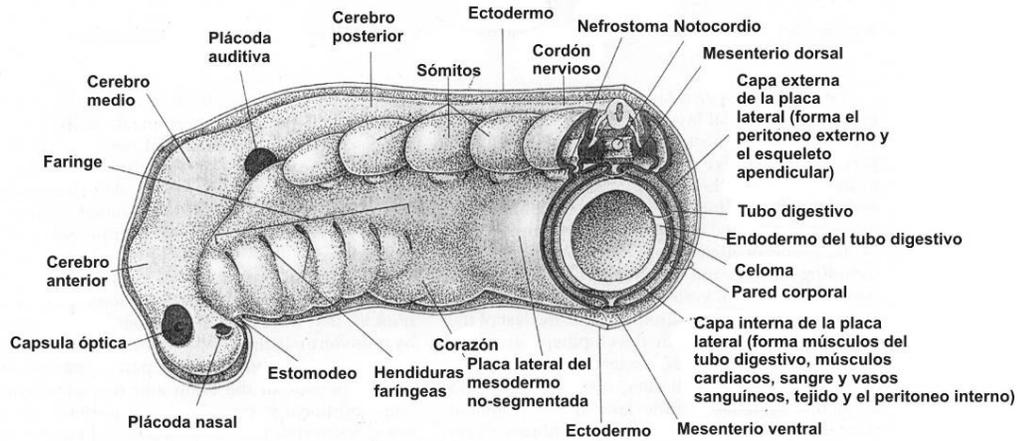


Figura 3. Vista tridimensional de una porción de un vertebrado generalizado en un estado del desarrollo llamado faringula, cuando los sacos branquiales aparecen. El ectodermo es eliminado, mostrando la segmentación de los somitas. Modificado de Pough & Janis (2019³).

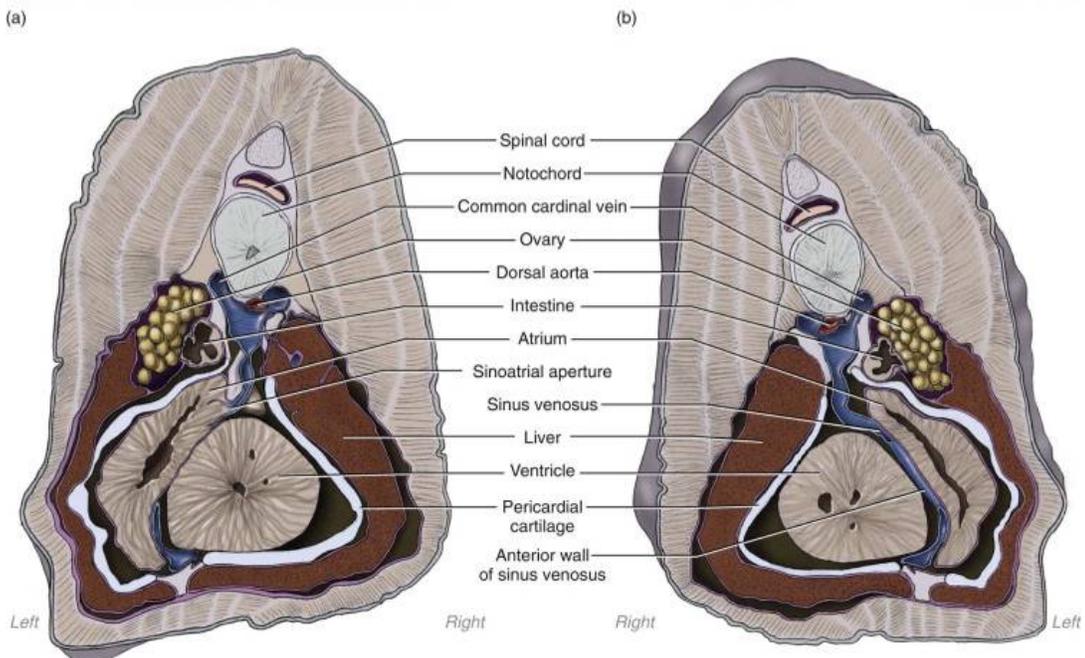


Figura 4. Sección transversal a través del cuerpo de la lamprea (*Petromyzon marinus*) mostrando la estructura del corazón. (A) porción anterior de la sección en vista posterior; (B) porción posterior de la sección en vista anterior. Según De Iuliis & Pulerà (2019).

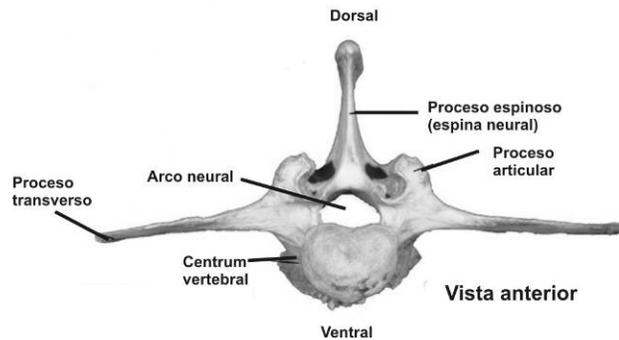


Figura 5. Vista anterior de una vértebra lumbar procélica típica de un mamífero.

³ Pough, F.H. & Janis, C.M. 2019. Vertebrate life. Tenth edition. Oxford University Press, New Jersey. 552 + appendages pp.

Tabla 1. Resumen de las divisiones (regiones) y estructura de la columna vertebral y las especializaciones de algunas vertebras en los diferentes grupos de vertebrados.

Regiones (divisiones) de la columna vertebral					
Chondrichthyes	Actinopterygii	Lissamphibia	Lepidosauria	Archosauria, Aves & Mammalia	
		1 vertebral cervical (cuello - solamente atlas)	> 1 vértebra cervical (cuello) (atlas, axis y demás)	> 1 vértebra cervical (cuello) (atlas, axis y demás)	
Tronco – con costillas	Tronco – con costillas	Tronco – con costillas cortas en salamandras	Tronco – con costillas	Región torácica – con costillas	
		1 vertebra sacra		Lumbar	
Caudal	Caudal	Caudal (cola –en salamandras)	Caudal (cola)	Caudal (cola)	
Estructura de las vértebras en la mayoría de vertebrados					
Región cervical (sólo tetrápodos)	Tronco o región torácica		Región lumbar (algunos amniótos)	Región sacra (en tetrápodos)	Región caudal
Espina neural – reducida o ausente	Espina neural		Espina neural	Espina neural	Espina neural
Arco neural	Arco neural		Arco neural	Arco neural	Arco neural
Canal neural	Canal neural		Canal neural	Canal neural	Canal neural
Centrum	Centrum muestra superficies de articulación a las costillas		Centrum	Centrum – pueden fusionarse de varias vertebras, si son > 1	Centrum
				Las aves con sinsacro : fusión de vertebras de las regiones torácica, lumbar, sacra y caudal	
La mayoría: los procesos transversos son pequeños y articulados con las cortas costillas	Procesos transversos se articulan con largas costillas (en la mayoría)		Largos procesos transversos para adhesión de músculos, pero no de las costillas	Procesos transversos grandes y suturados (no fusionados) al ilion en la cintura pélvica (pélvis)	Procesos transversales grandes en algunos o estar reducidos o ausentes
Aves y mamíferos: procesos transversos y las costillas se fusionan, dejando pequeños forámenes para el paso de los vasos sanguíneos	La mayoría de tetrápodos: costillas se insertan en el esternón		Archosauria: caimanes y aligátore tiene gastralia (costillas abdominales)		Pigóstilo : ultima vertebral en Aves
	Eternón en las aves es grande & tiene una quilla				Cóccix : vertebra caudal reducida en humanos
					Canal hemal contiene arterias & venas
					Arco hemal (costilla ventral) puede estar reducido, si las vértebras caudales son pequeñas
					Espina hemal puede ser larga o estar ausente
Especializaciones de algunas vertebras de tetrápodos					
Atlas – 1ª vértebra cervical (en todos los tetrápodos)	Axis – 2ª vértebra cervical (sólo en amniótos)	Cigoapósis anteriores (extensiones hacia adelante)		Cigoapósis posteriores (extensiones hacia atrás)	
Canal neural grande	Espina neural larga	En el lado anterior		En el lado posterior	
Proceso transversal pequeño		Superficies orientadas hacia arriba y adentro		Superficies orientadas hacia abajo y afuera	
Centrum reducido	Proceso odontoide sobre la región anterior del centrum				
El atlas se articula con el cóndilo (s) occipital (es)	Axis se articula con el atlas. Proceso odontoide se ajusta dentro del canal neural del atlas	Las serpientes tienen extra-articulaciones únicas (cigósfero y cigántrum) entre las vértebras para detener rotación			

Tabla 1. Continuación.

Forma del centro vertebral en vertebrados					
Chondrichthyes	Actinopterygii	Lissamphibia	Lepidosauria o Archosauria	Aves	Mammalia
Anficélica	Anficélica	Anficélica (salamandras)			Acélicas
		Procélica -anuro	Procélica	Heterocélica - cervicales	Opistocélica – cervicales en algunos grandes ungulados

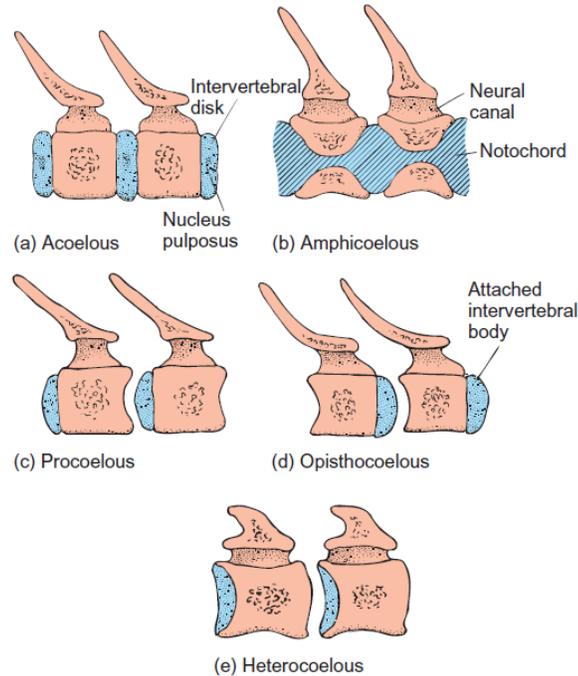


Figura 6. Formas generalizadas de los centros vertebrales. Las formas de los extremos centrales articulados, como se ve en la sección sagital, definen tipos anatómicos específicos (región anterior a la derecha de la figura): (a) *acélica*, ambos extremos son planos; (b) *anficélica*, ambos extremos son cóncavos; (c) *procélica*, extremo anterior es cóncavo; (d) *opistocélica*, extremo posterior es cóncavo; (e) *heterocélica*, extremos articulados en forma de silla de montar.

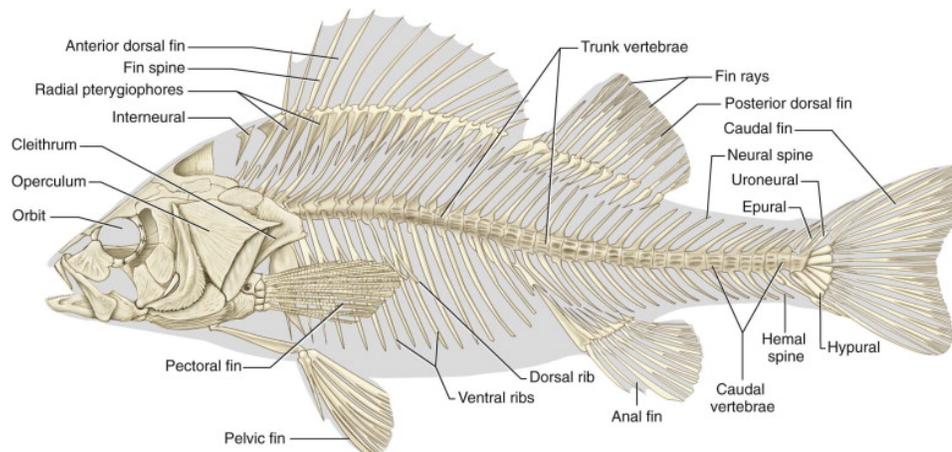


Figura 7. Esqueleto de una perca (Teleostei) en vista lateral izquierda. Se muestra como las vértebras, de tipo acélica (con centro plano en ambas caras), están muy unidas entre sí. Según De Iuliis & Pulerà (2019).

Las vértebras de tetrápodos necesitan un apoyo para soportar los efectos de la fuerza de gravedad y prevenir que la espalda se doble. Estas vertebrales tienen pre- y post-cigoapófisis que permite la articulación entre ellas, dando un apoyo adicional y limita el espectro total y la dirección del movimiento corporal. Las pre-cigoapófisis están en el lado anterior de la vertebra y tiene superficies (facetas) de articulación orientadas hacia arriba (Fig. 8). Las pos-cigoapófisis están en el lado posterior de la vertebra y tienen facetas de articulación dirigidas hacia abajo (Fig. 8). De esta manera, las facetas de las pos-cigoapófisis descansan sobre las facetas de la pre-cigoapófisis.

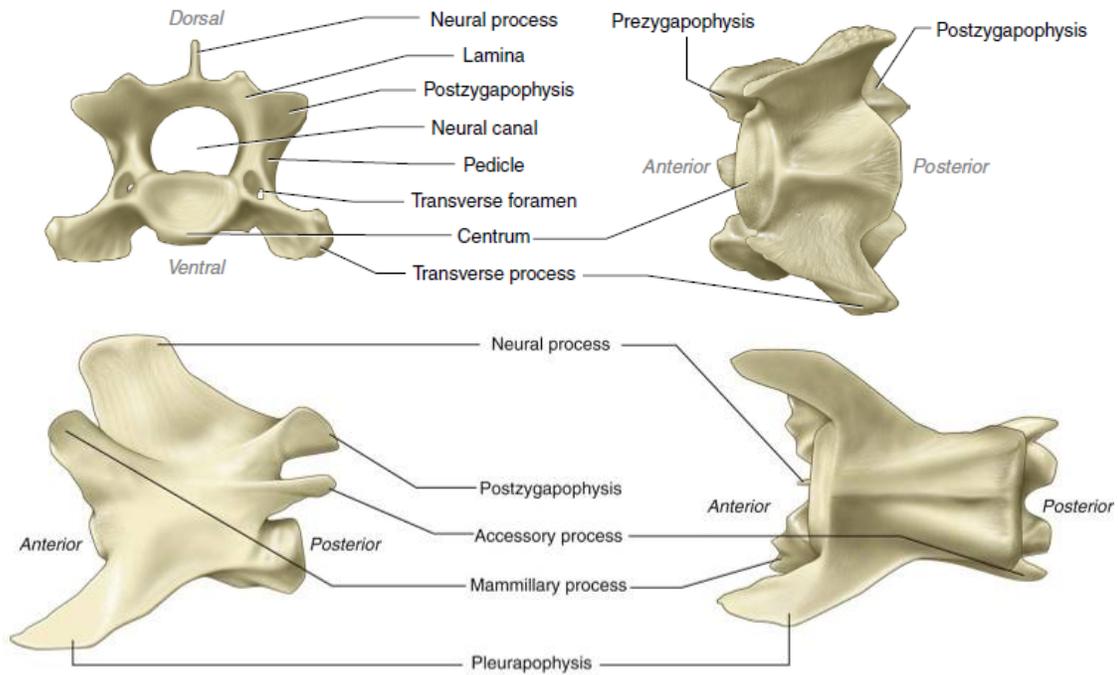


Figura 8. Dos vértebras procélicas del gato *Felis silvestris catus* (Mammalia: Felidae): cervical (arriba; vista posterior y ventral) y lumbar (abajo; vista lateral izquierda y ventral). Se muestran los procesos articulares anterior (pre-cigoapófisis) y posterior (pos-cigoapófisis) donde se articulan las vértebras anteriores y posteriores, respectivamente. Según De Iuliis & Pulerà (2019).

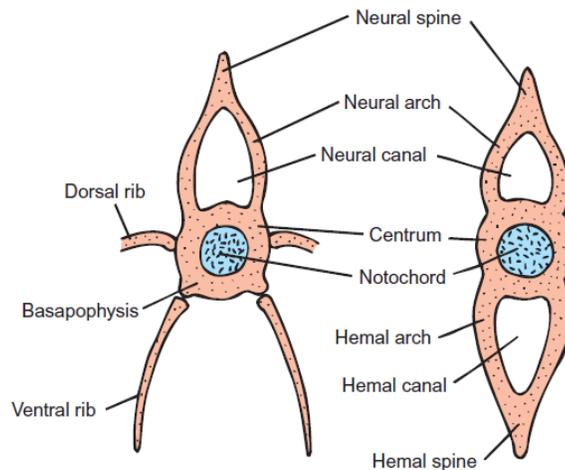


Figura 9. Sección transversal de la vértebra del tronco (izquierda) y caudal (derecha) de un pez. Según Kardong (2012).

Columna vertebral y sus regiones:

Los **peces** tienen dos regiones en la columna vertebral: tronco y cola (Fig. 10). Las **vértebras del tronco tienen costillas unidas** y las **vértebras caudales forman la cola**. Las vértebras caudales de los peces tienen grandes canales y espinas hemales (Fig. 9). Los tetrápodos anamniotes tienen cuatro regiones en la columna vertebral. Tienen una sola vértebra cervical o vértebra del cuello, llamada atlas (Fig. 11).

La vértebra atlas en los anfibios tiene grandes facetas en las pre-cigoapófisis que se articulan con los cóndilos pareados que ellos poseen. Costillas cortas están unidas a los procesos transversos en las vértebras del tronco de las salamandras (Fig. 12). Los tetrápodos tienen una sola vértebra sacra que se une a la cintura pélvica. Las vértebras caudales tienen típicamente grandes arcos y espinas hemales. En las ranas, las vértebras caudales se han fusionado en una estructura en forma de bastón llamado el **urostilo** (Fig. 11).

Tronco

Región caudal = cola

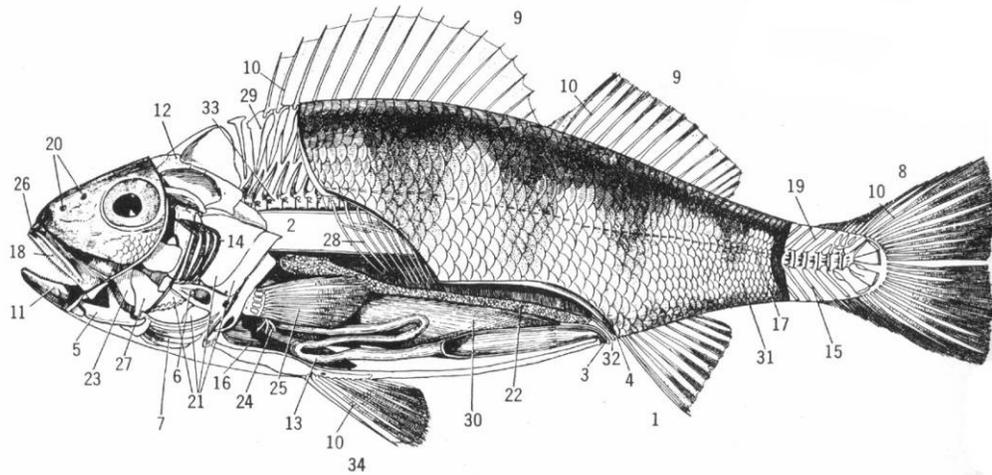


Figura 10. Disección esquemática de una perca (Teleostei). 1, aleta anal; 2, vejiga natatoria; 3, ano; 4, poro abdominal; 5, articular; 6, bulbo arterioso (cono arterioso); 7, radios branquiostegos; 8, aleta caudal; 9, aletas dorsales; 10, radios dérmicos; 11, dentario; 12, cresta dorsal del cráneo; 13, intestino; 14, arcos branquiales; 15, espinas hemales (forman el arco hemal de las vértebras); 16, hígado; 17, línea lateral; 18, maxilar; 19, espinas neurales (forman el arco neural de las vértebras); 20, aberturas nasales (narinas); 21, huesos operculares; 22, ovario; 23, pterigoides; 24, apéndices pilóricos; 25, aleta pectoral; 26, premaxilar; 27, cuadrado; 28, costillas; 29, soportes basales de la aleta, 30, estomago; 31, escamas; 32, orificio urogenital; 33, centrum o cuerpo de las vértebras; 34, aleta pélvica (ventral). Modificado de Romer & Parsons 1981⁴).

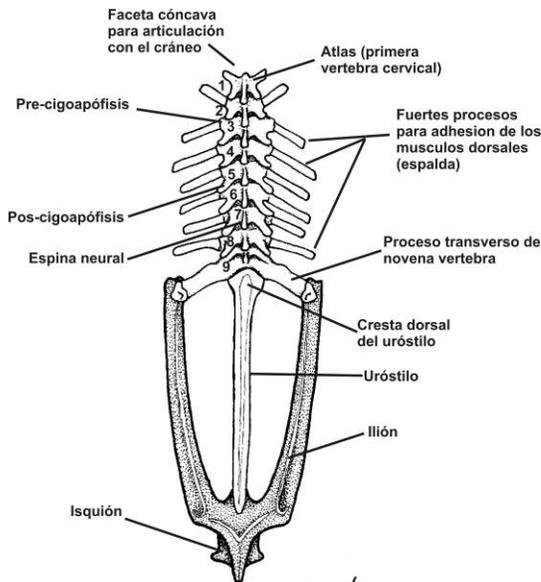


Figura 11. Vista dorsal del esqueleto axial de un anuro. La columna vertebral solo presenta nueve vértebras y las vértebras sacras se han fusionado con las caudales en una estructura llamada urostyle.

Un esternón está presente solamente en tetrápodos y este puede en algunos grupos reducirse o perderse (en ranas). Por ejemplo, el esternón es cartilaginoso y diminuto en salamandras. El esternón actúa como un sitio de apoyo de la caja torácica o de apoyo adicional para la cintura pectoral.

Los peces tienen aletas mediales no pareadas localizadas a lo largo del eje medio sagital. Estas son las aletas dorsal, anal y caudal (Fig. 13). Los peces pueden tener una o más aletas dorsales. La aleta caudal varía en diseño (heterocerca, homocerca y díficerc) (Fig. 14). Las aletas de tipo heterocerca están presentes en Chondrichthyes y algunos Actinopterygii primitivos (condrósteos). En estas colas, las vértebras caudales se extienden hacia el lóbulo grande en posición dorsal en la aleta caudal. La mayoría de Actinopterygii vivientes tiene una aleta caudal derivada de tipo homocerca que tiene un perfil de lóbulos dorsal y ventral simétricos. Las vértebras caudales no presentan un ángulo de orientación hacia arriba o hacia abajo.

⁴ Romer, A.S. & Parsons, T.S. 1981. Anatomía comparada. Quinta edición. Nueva Editorial Interamericana, México D.F. 428 pp.

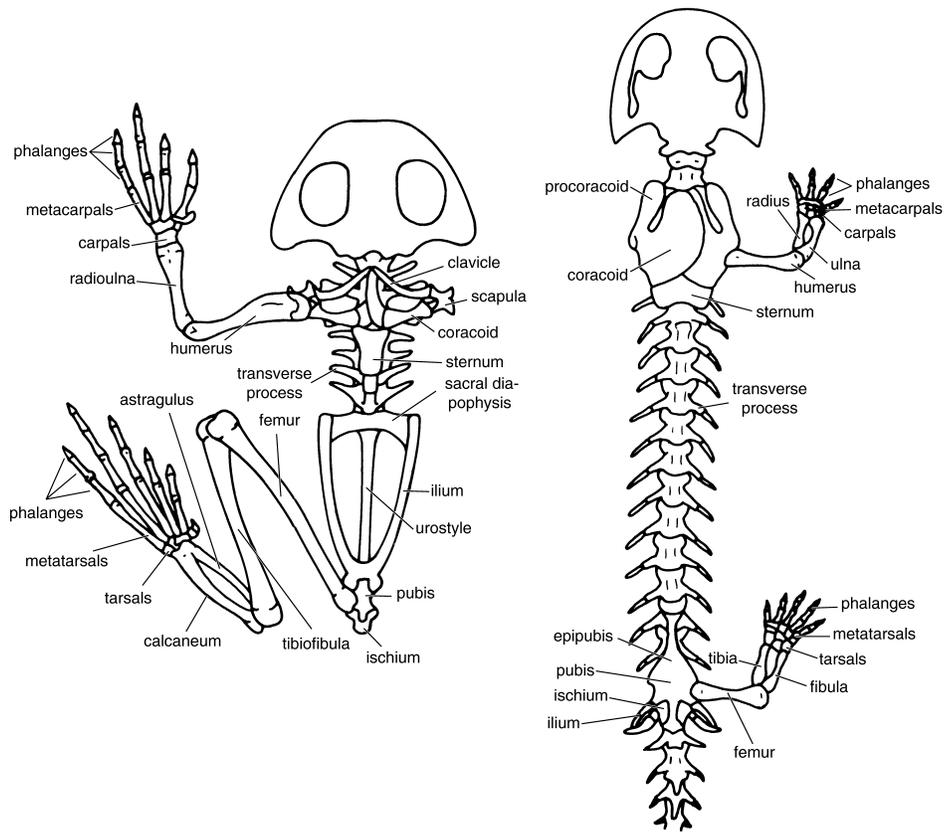


Figura 12. Diagrama simplificado de los esqueletos poscraniales de un anuro (izquierda) y de una salamandra (derecha). En las salamandras, como son animales con cola hay presencia de las vértebras caudales posteriores al sitio de inserción de las extremidades posteriores con la cintura pélvica. Modificado de Vitt & Caldwell (2014⁵).

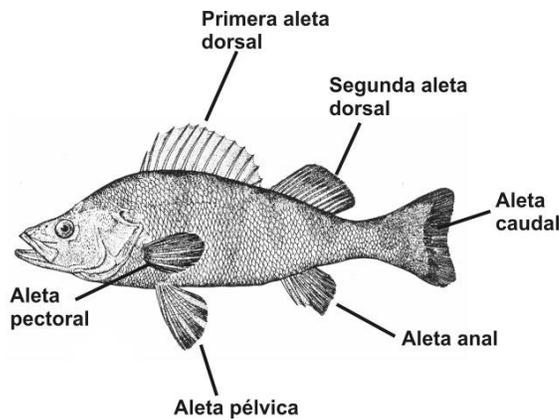


Figura 13. Topografía simplificada de un pez teleosteo (perca). En este ejemplo se muestran dos aletas dorsales, pero otros teleosteos solo poseen una única aleta dorsal que se extiende a lo largo del dorso del animal. En el caso de las dos aletas dorsales, la primera o anterior es espinosa, con radios fuertes y la segunda o posterior es más suave y carnosa. Modificado de Romer & Parsons (1981)

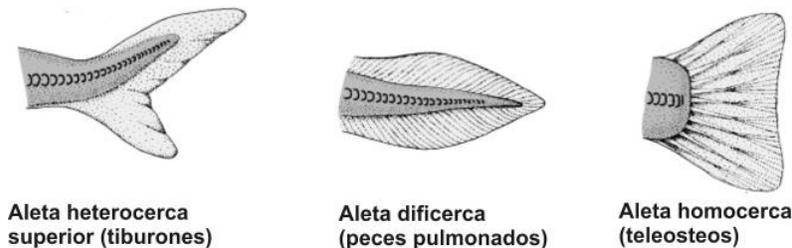


Figura 14. Tipos generales de aletas en peces. Modificado de Hickman *et al.* (2017⁶).

⁵ Vitt, L.J. & Caldwell, J.P. 2014. Herpetology: an introductory biology of amphibians and reptiles. Fourth edition. Elsevier, London. 757 pp.

⁶ Hickman, C.P., Jr., Keen, S.L., Eisenhour, D.J., Larson, A. & I'Anson, H. 2017. Integrated principles of zoology. Seventeenth edition. McGraw Hill, New York. 834 pp.