



ACCESO ABIERTO

EDITADO POR

 Jeffrey C. Petruska,
 Universidad de Louisville, Estados Unidos

REVISADO POR

 Paul DiRusso,
 Instituto Neurológico Mediterráneo
 Neuromed (IRCCS), Italia

 Juan Barbagli,
 Banner - Centro Médico Universitario de Phoenix,
 Estados Unidos

 Ashraf Naeim,
 Universidad de Zagazig, Egipto

*CORRESPONDENCIA

 Edgar Buloz-Osorio
 ✉ edgar.buloz@uab.cat

RECIBIDO el 17 de diciembre de 2024

ACEPTADO el 10 de marzo de 2025

PUBLICADO el 25 de marzo de 2025

CITACIÓN

Buloz-Osorio E, Ortega-Sánchez M, Royo-Salvador MB y Rodríguez-Baeza A (2025) Análisis morfológico del filum terminale y descripción detallada del filum terminale externum distal: un estudio cadavérico.

Frente. Neuroanat. 19:1547165. doi: 10.3389/fnana.2025.1547165

DERECHOS DE AUTOR

 © 2025 Buloz-Osorio, Ortega-Sánchez, Royo-Salvador y Rodríguez-Baeza. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la [Licencia de Atribución Creative Commons \(CC BY\)](#). Se permite el uso, la distribución y la reproducción en otros foros, siempre que se cite al autor original y al titular de los derechos de autor, y se cite la publicación original en esta revista, de acuerdo con la práctica académica aceptada. No se permite ningún uso, distribución ni reproducción que no cumpla con estos términos.

Análisis morfológico del filum terminale y descripción detallada del filum terminale externum distal: un estudio cadavérico

 Edgar Buloz-Osorio^{1,2,3*}, Marisa Ortega-Sánchez^{3,4}, Miguel B. Royo-Salvador⁵ y Alfonso Rodríguez-Baeza³
¹ Instituto Guttmann, Instituto Universitario de Neurorehabilitación Affiliated with the Universidad Autónoma de Barcelona, Badalona, Spain, ² Fundación Instituto de Investigación en Ciencias de la Salud Germans Trias y Pujol, Barcelona, España, ³ Unidad de Anatomía y Embriología Humana, Departamento de Ciencias Morfológicas, Facultad de Medicina, Universidad Autónoma de Barcelona, Cerdanyola del Vallès, España, ⁴ Instituto de Medicina Legal y Ciencias Forenses de Cataluña, Barcelona, España, ⁵ Instituto Chiari y Siringomiella and Escoliosis de Barcelona, Barcelona, Spain

Este estudio anatómico cadavérico, observacional y descriptivo, tuvo como objetivo identificar, caracterizar y analizar los parámetros morfométricos del filum terminale (FT) y describir macroscópicamente la inserción distal del FTE. El FT es una estructura fibrocelular tridimensional compleja de tejido conectivo y células gliales, que se extiende desde el cono medular (CM) hasta el saco dural (SD) y el cóccix. Se divide en dos segmentos: un filum terminale internum intradural (FTI) y un filum terminale externum extradural (FTE).

Pocos

Estudios han abordado exhaustivamente sus características morfométricas en las últimas décadas. Treinta y ocho humanos embalsamados (M = 16, F = 22) se examinaron cadáveres para determinar el CM-FTI y el DS-FTE vertebral.

Niveles y longitudes y anchos de FT, FTI y FTE. Se evaluaron los diámetros segmentarios de FTI y FTE, sus correlaciones, características macroscópicas, tensión y movilidad in situ y ex vivo. Se describe detalladamente la inserción distal de FTE.

Las longitudes medias de FT, FTI y FTE fueron de 254,32 mm ($\pm 26,46$), 152,75 mm ($\pm 22,02$) y 106,64 mm ($\pm 12,21$), respectivamente. La unión CM-FTI se observó en el espacio discal L1-L2 (32,1%), la fusión DS-FTE en el tercio superior de S2 (39,3%) y la fusión FTI-DS en la línea media de DS (46,4%).

La longitud del FT y el FTI, así como la longitud del FTE, mostraron una correlación directa, al igual que todos los diámetros del FTI. Las características macroscópicas del FT fueron: superficie irregular (71,4%), tono brillante (57,1%), contraste macroscópico FTI-CM (64,3%), forma filiforme (60,7%) y resistencia al movimiento (53,6%). El FTE presentó una forma aplanada (64,3%), inmovilidad (60,7%), inserción distal en Cx1 (67,8%) y una hebra distal (60,7%). Los segmentos del FTI ≥ 2 mm fueron poco frecuentes (21,4%).

La inserción distal del FTE es variable, insertándose en hebras, rodeada de tejido vascular. Se describe por primera vez en detalle un plexo venoso cóccigeo distal y las inserciones en hebras individuales o múltiples del FTE distal. Las discrepancias en los parámetros morfométricos del FT entre estudios resaltan la necesidad de protocolos estandarizados, especialmente dada su importancia anatómico-clínica y su posible papel como nicho progenitor neural. Proporcionamos una base integral para...

futuros análisis morfométricos estandarizados, reconociendo las limitaciones de los estudios de cadáveres embalsamados.

PALABRAS CLAVE

Filum terminale, médula espinal, estudio cadavérico, neuroanatomía, duramadre, cono medular, saco dural, síndrome de médula anclada

1 Introducción

El filum terminale (FT) es una banda fibrosa tridimensional compleja de tejido conectivo que se extiende desde la parte distal del cono medular (CM) hasta el cóccix (Abdulrazeq et al., 2023; De Vloo et al., 2016; Hansasuta et al., 1999; Pinto et al., 2002; Standing, 2021). Tradicionalmente se clasifica en dos segmentos distintos: la parte intradural = filum terminale internum (FTI); y la parte extradural = filum terminale externum (FTE) o ligamento coccígeo (Dauber et al., 2021; Pinto et al., 2002; Saker et al., 2017; Figuras 1, 2). El FT está compuesto principalmente de colágeno, fibras elásticas, células gliales y vasos sanguíneos (Li et al., 2016; Nasr et al., 2018).

Macroscópicamente, el FT se describe como un filamento delgado, filiforme y filiforme que se extiende caudalmente desde el CM, la terminación caudal de la médula espinal (Rouvière et al., 2009; Standing, 2021). El FTI continúa desde el CM hasta el saco dural inferior (SD), con el cual se fusiona, formando el FTE. Continúa desde la porción distal del SD y se adhiere o fusiona con el periostio coccígeo dorsal, típicamente en la primera vértebra coccígea (Cx1), llegando ocasionalmente a la segunda vértebra coccígea (Cx2) (Dauber et al., 2021; De Vloo et al., 2016; Saker et al., 2017). Si bien la unión CM-FTI se ubica comúnmente en la primera vértebra lumbar (L1), las variaciones reportadas incluyen su presencia en el tercio inferior de T11 o incluso en el tercio superior de L3 (De Vloo et al., C; Pinto et al., 2002).

Durante su descenso desde el CM hasta el DS, el FTI está rodeado por la cola de caballo (CE) y extensiones de la duramadre y las meninges aracnoideas (Namba, 2016; Standing, 2021). Continúa desde el CM como una prolongación filamentosa, larga y delgada de la piamadre, que se inserta en la línea media distal de la duramadre, lo que forma un fondo de saco denominado saco tecal o dural (Hansasuta et al., 1999; Rouvière et al., 2009; Standing, 2021; Tubbs et al., 2016). El DS se localiza típicamente en el tercio superior, medio o inferior de la segunda o tercera vértebra sacra, marcando el límite distal del FTI (Rouvière et al., 2009; Tubbs et al., 2016). La FTI reside dentro del canal sacro superior, junto con las meninges y el CE (De Vloo et al., 2016; Hansasuta et al., 1999; Standing, 2021).

El FTE, una extensión de la duramadre, comienza distalmente después de que el FTI perfora o se fusiona con el DS, ya sea en su línea media o en sus zonas laterales, descendiendo por el canal sacro y emergiendo por debajo del hiato sacro. Luego atraviesa el cuerpo de la quinta vértebra sacra y la articulación sacrococcígea, y termina en el dorso de la primera o segunda vértebra coccígea (Hansasuta et al., 1999; Standing, 2021; Tubbs et al., 2016). El diámetro del FT varía entre humanos y segmentos vertebrales; Yamada et al. (2007) sugieren un diámetro normal de 1,50 mm ± 0,50 mm.

La anatomía vascular del FT, a menudo pasada por alto, incluye la arteria única del filum terminale como una continuación de la arteria espinal ventral.

Arteria, aunque se han descrito individuos con una arteria FT duplicada (Djindjian et al., 1988; Harmeier, 1933; Iampreechakul et al., 2022; Lim et al., 2011). La arteria del filum terminale contribuye al eje arterial espinal anterior y a su cesta vascular como rama distal (Rojas et al., 2018). También se ha descrito como una extensión ventral de la rama descendente de la arteria de Adamkiewicz (Djindjian et al., 1988; Lim et al., 2011; Schmolling et al., 2023).

En el segmento más distal del MC, esta arteria puede bifurcarse o trifurcarse, formando conexiones anastomóticas con las arterias espinales posteriores (Lim et al., 2011). Irriga el cuerpo del nervio coccígeo y disminuye su diámetro a lo largo de su recorrido longitudinal (Lim et al., 2011; Tubbs et al., 2016). También se ha descrito una pequeña arteria que irriga el nervio coccígeo, adherida a la porción proximal del nervio coccígeo (Djindjian et al., 1988).

La vena del filum terminale se encuentra generalmente dorsal a la arteria y se extiende desde la parte más distal del FTE hasta los segmentos más proximales del FTI y el CM (Lim et al., 2011; Rouvière et al., 2009; Standing, 2021). La vena FT y las venas ventrales de la médula espinal se conectan a través del plexo venoso extradural sacro (Djindjian et al., 1988).

La investigación sobre los parámetros morfométricos del FT es escasa, con solo seis estudios dedicados exclusivamente a las características anatómicas del FT publicados en las últimas décadas (Cai et al., 2024; De Vloo et al., 2016; Fontes et al., 2006; Nasr et al., 2018; Picart et al., 2019; Pinto et al., 2002). Los estudios difirieron enormemente en el tipo de cadáver evaluado (fresco, congelado o embalsamado), en la selección de diferentes longitudes de FTI y FTE para el análisis segmentario y de ancho, y en el objetivo y la metodología de los estudios. Estas discrepancias han permanecido sin resolver, principalmente debido a limitaciones metodológicas, como la falta de protocolos de análisis estandarizados.

Hasta donde sabemos, la inserción distal del FTE tiene No se ha descrito significativamente en la literatura existente.

Recientemente se le ha prestado atención dadas sus implicaciones clínicas en patologías de la columna como la escoliosis (Fluss et al., 2024), el síndrome de la médula anclada (Chern et al., 2011; Miyagami et al., 2024; Otto et al., 2023; Yamada et al., 2007), el síndrome de la enfermedad del filum (Royo-Salvador et al., 2020; Royo-Salvador et al., 2024), ependimomas mixopapilares (Balodis et al., 2024; Kouhen et al., 2024), tumores neuroendocrinos (Dharanipathy et al., 2023; Popov et al., 2023; Zhu et al., 2023) y fistulas arteriovenosas (Guo y Yu, 2023; 2022; Ota, 2023; Schmolling et al., 2023; Zhu et al., 2023). Además, el FT se ha propuesto como un nicho progenitor neuronal atípico en humanos y animales (Arvidsson et al., 2011; Chrenek et al., 2017; Jiang et al., 2022; Klinge et al., 2022; Nakano et al., 2019; Varghese et al., 2010). Esto genera la necesidad de estudios más exhaustivos y de mayor calidad sobre el FT debido a la brecha de conocimiento entre las características anatómicas de la estructura y su importancia clínica.

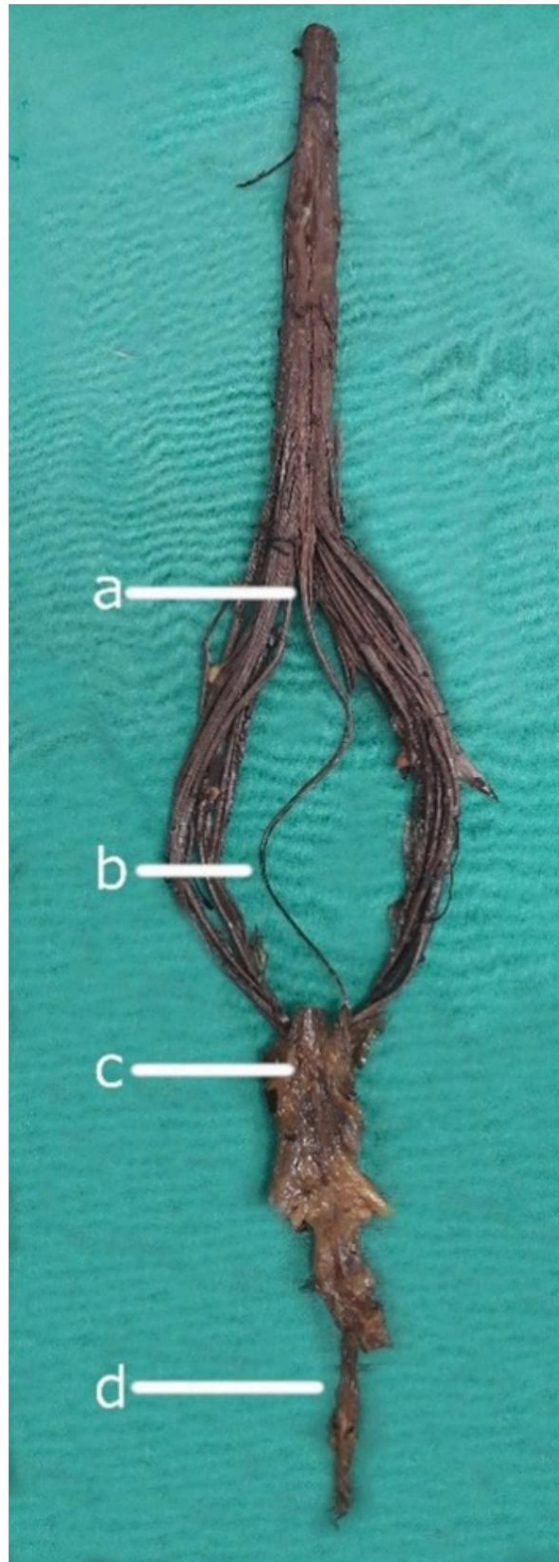


FIGURA 1

Componentes neuroanatómicos del filum terminale. (a) Cono medular: La porción distal y cónica de la médula espinal. (b) Filum terminale internum: La continuación intradural del filum terminale, que se extiende desde el cono medular. (c) Saco dural: La vaina membranosa formada por la duramadre que rodea la médula espinal y sus raíces. (d) Filum terminale externum: La porción del filum terminale que se extiende desde el saco dural hasta su inserción en el cóccix.



FIGURA 2

Relaciones anatómicas detalladas y anatomía segmentaria del filum terminale. (a) Unión del cono medular y el filum terminale internum: La transición anatómica entre la médula espinal y su filum terminale internum. (b) Saco dural: La continuación de la duramadre que encierra la médula espinal y se extiende hasta el filum terminale internum. (c) Segmento distal del filum terminale externum: La porción extrameníngea del filum terminale, que pasa más allá del saco dural para unirse al cóccix.

El presente estudio tuvo como objetivo identificar, caracterizar y analizar la estructura, las variables morfométricas, los parámetros y las características macroscópicas del FT. También buscamos describir nuevas características macroscópicas de la inserción distal del FTE. Además, nos propusimos presentar un protocolo de consenso para el análisis morfométrico y descriptivo del FT, con el fin de estandarizar el enfoque para estudiar su anatomía, propiedades biomecánicas y su importancia clínico-quirúrgica subestimada.

2 Materiales y métodos

2.1 Procedimientos éticos

Todos los cadáveres fueron donados para investigación médica y científica. Se obtuvo el consentimiento informado de los donantes o sus representantes legales. El Comité de Ética de Experimentación Humana de la Universitat Autònoma de Barcelona otorgó la aprobación ética para este estudio (Procedimiento 2904, aprobado el 27/03/2015).

2.2 Selección de especímenes

En este estudio se utilizaron treinta y ocho médulas espinales humanas obtenidas de cadáveres embalsamados. Estos cadáveres se emplearon debido a su disponibilidad y accesibilidad en nuestro departamento. Además, la estabilidad y consistencia de las estructuras anatómicas, junto con la prevención de alteraciones post mortem, fueron factores clave para la selección de este tipo de espécimen. Se excluyeron del estudio los especímenes con patologías espinales.

2.3 Proceso de disección

El procedimiento de disección se realizó con el cadáver en decúbito prono. Se realizó una incisión cutánea y aponeurótica dorsal en la línea media, por encima de las apófisis espinales torácicas y lumbares, que se extendía

A las crestas sacras medias y al cóccix. Tras la exposición de las láminas lumbares, se realizaron laminectomías lumbosacras bilaterales extensas desde T11 hasta S3-S5. Posteriormente, se realizó una incisión longitudinal media a través de la duramadre caudal para exponer el CM y el FTI dentro de la unión CM-FTI.

2.4 Medidas anatómicas y evaluación morfológica

Los niveles de fusión vertebral de la unión CM-FTI y DS—FTE se describieron siguiendo el método desarrollado por [Hansasuta et al. \(1999\)](#). La fijación lateral de la duramadre y la conformación de la cola de caballo facilitaron la visualización y descripción de las características anatómicas macroscópicas ([Figura 3](#)). Se realizaron mediciones ex vivo de las longitudes (L) de FT, FTI y FTE, mientras que los diámetros (D) de FTI (FTI-D1 a D5) y FTE (FTE-D1 a D3) se evaluaron siguiendo el protocolo descrito por [De Vloot et al. \(2016\)](#), midiendo su anchura en cinco segmentos equidistantes para FTI y tres segmentos equidistantes para FTE ([Figura 4](#)). Las características biomecánicas de FTI y FTE, como la tensión y la movilidad, se evaluaron in situ, sin resistencia externa, y se caracterizó la estructura.

como móvil o inmóvil según la evaluación de tracción manual.

2.5 Evaluación del cable terminal externo

Se realizó una evaluación macroscópica de la inserción distal del FTE y su tejido circundante, tanto in situ como ex vivo, y se describió el número de hebras superponiendo muestras fotográficas de las hebras de FTE.

2.6 Equipos e instrumentos

Las mediciones se tomaron utilizando un calibrador Vernier digital de alta precisión de 300 mm (Würth, Künzelsau-Gaisbach, Alemania). El análisis estadístico, incluyendo el cálculo de medias y desviaciones estándar para variables continuas y frecuencias y porcentajes para variables nominales, se realizó utilizando GraphPad Prism v8.00 (GraphPad Software, La Jolla, California, EE.UU.).



FIGURA 3

Discción y exposición del cono medular y el filum terminale interno. Disección ilustrativa que resalta el cono medular (*) y el filum terminale interno estrechamente asociado, mostrando la porción terminal de la médula espinal y su extensión intradural.

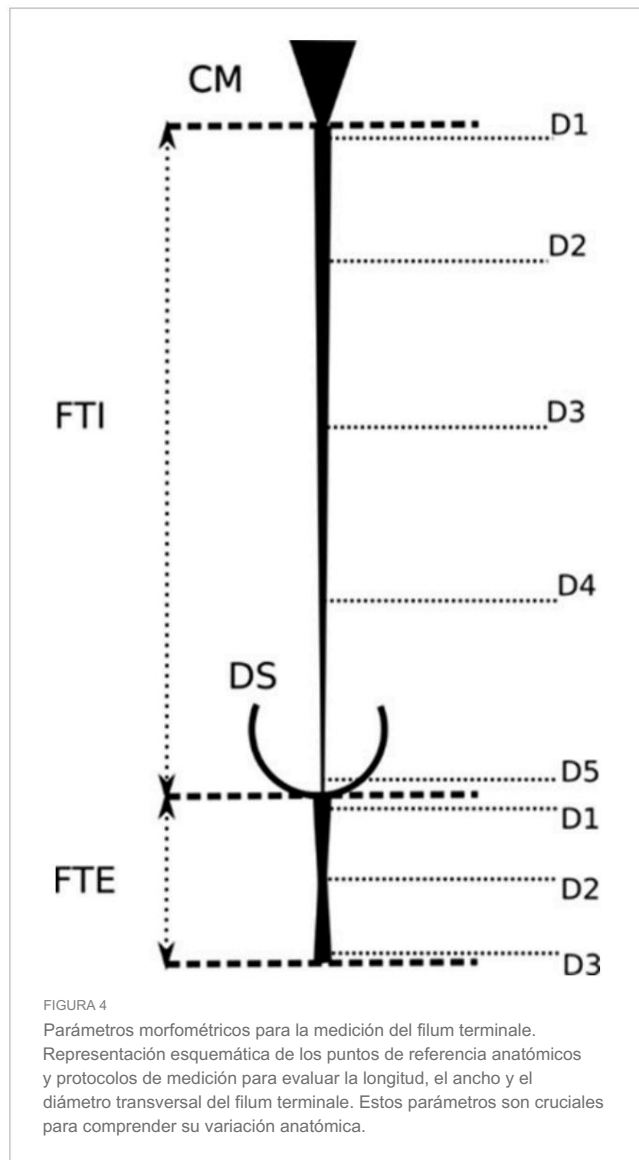


FIGURA 4

Parámetros morfométricos para la medición del filum terminale. Representación esquemática de los puntos de referencia anatómicos y protocolos de medición para evaluar la longitud, el ancho y el diámetro transversal del filum terminale. Estos parámetros son cruciales para comprender su variación anatómica.

2.7 Análisis estadístico

Pruebas t independientes y análisis de varianza unidireccional

Se emplearon análisis de varianza (ANOVA) para identificar relaciones entre medias, mientras que se utilizó una prueba de coeficiente de correlación r de Pearson bivariada de dos colas.

y se emplearon p de Spearman para identificar correlaciones entre variables continuas y entre variables ordinales, respectivamente.

La significación estadística se estableció en $p \leq 0,05$.

3 resultados

3.1 Demografía

El estudio analizó treinta y ocho cadáveres humanos embalsamados, con una edad media al fallecer de 82,1 años (DE 8,7, rango 60-94 años), de los cuales veintidós eran mujeres (60,7%) y dieciséis hombres (39,3%). La edad no mostró una correlación significativa con la longitud total del FT o del FTI. Sin embargo, se observó una pequeña correlación inversa entre la edad y la longitud del FTE ($p = 0,040$; $r = -0,390$).

TABLA 4 Análisis de la matriz de correlación de las longitudes (L) del filum terminale (FT), filum terminale internum (FTI) y filum terminale externum (FTE) y diámetros (D).

	Longitud FT	Longitud FTI	Longitud FTE	FTI-D1	FTI-D2	FTI-D3	FTI-D4	FTI-D5	FTE-D1	FTE-D2	FTE-D3			
Longitud FT	1	0.889***	0.559**	0.056	0.122	0.284	0.441*	0.008	-0.097	-0,137	-0.023			
Longitud de FTI	0.889***	1	0.116	0.053	-0.036	0.214	0.405*	-0,082	-0,224	-0,273	0.028			
Duración del FTE	0.559**	0.116	1	0.028	0.333	0.233	0,225	0,17	0,201	0,198	-0,100			
FTI-D1	0.056	0.053	0.028	1	0.664***	0.424*	0.428*	0.478*	0.078	-0,208	0.551**			
FTI-D2	0.122	-0.036	0.333	0.664***	1	0.681***	0.600***	0.371	0.207	-0.036	0.328			
FTI-D3	0.284	0.214	0.233	0.424*	0.681***	1	0.854***	0.498**	0.051	-0.055	0.187			
FTI-D4	0.441*	0.405*	0,225	0.428*	0.600***	0.854***	1	0,586***	-0,015	-0,22	0.094			
FTI-D5	0.008	-0.082	0,17	0.478*	0.371	0.498**	0,586***	1	-0,15	-0,399*	-0,11			
ETC-D1	-0.097	-0,224	0.201	0.078	0.207	0.051	-0,015	-0,15	1	0.733***	0.303			
ETC-D2	-0,137	-0,273	0.198	-0,208	-0.036	-0.055	-0,22	-0,399*	0.733***	1	0.288			
ETC-D3	-0.023	0.028	-0.100	0.551**	0.328	0.187	0.094	-0,11	0.303	0.288	1			

FT, cable terminal; FTI, cable terminal interno; FTE, cable terminal externo; D, diámetro; D1–D5, diámetros segmentarios proximal a distal de FTI y FTE; CM, cono medular; DS, Saco dural. Los valores en negrita indican * $p < 0,05$, ** $p < 0,005$, *** $p < 0,001$. [Basado en el modelo desarrollado por De Vloo et al. (2016)].

TABLA 5 Características macroscópicas del filum terminale.

Forma y superficie	Resultados	Aspectos brutos, contraste y tensión	Resultados	ETC características	Resultados
Forma de FTI	Filiforme 60,71% acanalado 32,14% se estancó 7,14%	Aspectos brutos de FT	Brillante 57,14% opaco 42,86%	Movilidad ETP	No 60,71% Si 39,29%
Forma de ETP	Aplanado 64,29% filiforme 35,71%	Contraste de FTI con CM	No 64,29% Si 35,71%	Inserción de FTE distal	Cx1 67,86% Cx2 32,14%
Superficie FT	Irregular 71,43% regular 28,57%	Tensión FTI	No 53,57% Si 46,43%	Número de FTE distales hebras	*1 (60,71%) *2 (17,86%) *3 (7,14%) *4 (14,29%)

FT, cable terminal; FTI, cable terminal interno; FTE, cable terminal externo; CM, cono medular.

Se observó correlación entre los niveles FTE-D1 y FTE-D2

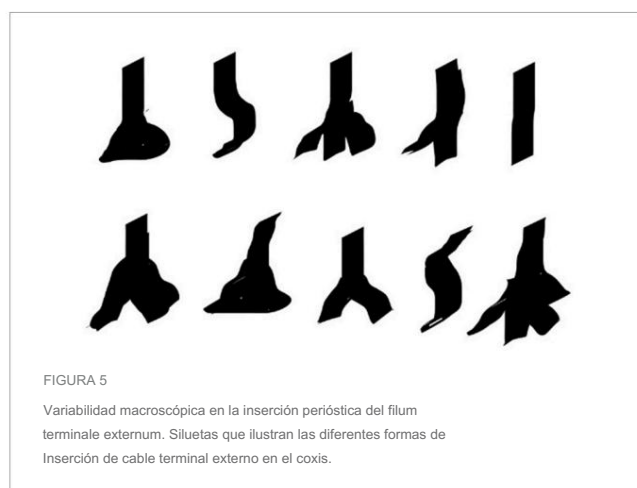
($p < 0,001$, $p 0,733$) (Tabla 4).

3.4 Diámetros FTI y macroscópicas características

Seis especímenes (15,7%) presentaron diámetros de FTI superiores a 2 mm. (rango: 2,01 mm–8,28 mm), con un caso coincidente con un nivel bajo Dismorfia sacra en S3. Características macroscópicas del FTI y el FTE. se describen en la Tabla 5.

3,5 observaciones ETP

Macroscópicamente, la inserción perióstica distal del FTE tenía diversas formas, que generalmente se manifiestan como una pirámide (Figura 5). No se encontró correlación entre la duración del FTE y el número de hebras distales de FTE ($p = 0,177$, $r = -0,26$). El tejido vascular fue observado macroscópicamente superficialmente y rodeando la porción distal. Inserción de FTE en el 71,4% de los especímenes, predominantemente similar tejido venoso (Figura 6). El examen anatómico no reveló ninguna lesión neural o Las variaciones relacionadas con los huesos y la fila grasa permanecieron ausentes en todo momento. Todos los especímenes.



4 Discusión

4.1 Cerrando la brecha

El filum terminale (FT) tradicionalmente ha sido pasado por alto en estudios neuroanatómicos, a pesar de su relevancia clínica. El prevalencia de síndromes y enfermedades relacionados con FT, como el filum



FIGURA 6

Inserción perióstica del filum terminale externum en el cóccix dorsal y las estructuras vasculares asociadas. Se muestra la inserción perióstica del filum terminale externum en el cóccix dorsal (flecha), destacando el plexo venoso circundante (*). Las estructuras vasculares de esta región pueden influir en los abordajes quirúrgicos y la patología.

Los lipomas terminales, el síndrome de médula anclada (SCT), las fistulas arteriovenosas (FAV), los quistes filares, los paragangliomas, los quistes epidermoides, los hemangioblastomas, el filum terminale engrosado, el filum terminale duplicado y los quistes de Tarlov, siguen siendo en gran medida desconocidos y probablemente subestimados; recientemente, ha habido un creciente interés en analizar sus características morfológicas, debido a sus implicaciones para las patologías espinales (Royo-Salvador et al., 2020; Yamada et al., 2004; Yamada, 2016) y la anestesia caudal (Namba, 2016), y su papel potencial como nicho de células progenitoras neuronales (Chrenek et al., 2017). Sin embargo, las descripciones anatómicas generales del FT son escasas y rara vez detalladas, lo que requiere la integración de varios parámetros y variables de estudios previos (De Vloo et al., 2016; Fontes et al., 2006; Hansasuta et al., 1999; Nasr et al., 2018; Picart et al., 2019; Pinto et al., 2002) para realizar un análisis exhaustivo y proponer un protocolo de consenso para describir el FT (Tabla complementaria 1).

4.2 Nuestro estudio e investigaciones previas

Nuestros datos morfométricos y descriptivos se alinean con algunos de los hallazgos de estudios anteriores (De Vloo et al., 2016; Hansasuta et al., 1999; Nasr et al., 2018; Picart et al., 2019; Pinto et al., 2002; Pokanan

et al., 2020). Aunque el CM tiende a estar en L1, existen discrepancias y variaciones en su localización específica. Si bien nuestros hallazgos y los de Picart et al. (2019) indican que el CM se ubica en el espacio discal entre L1 y L2, otros autores (De Vloo et al., 2016; Nasr et al., 2018; Pinto et al., 2002) lo describen de forma superior. El DS se describe clásicamente como ubicado en S2. En nuestro estudio, se localizó en el tercio superior de S2, como se informó previamente (Hansasuta et al., 1999; Nasr et al., 2018; Pinto et al., 2002; Pokanan et al., 2020), pero también en S1 y S3 (Figura 7).

Pocos estudios han descrito la fusión FTI-DS en detalle. Hansasuta et al. (1999) y Picart et al. (2019) observaron la fusión FTI-DS en la línea media del DS, pero nosotros encontramos que la mayoría de los FTI se fusionan no solo en la línea media, sino también en posición lateral. Curiosamente, encontramos que nuestras longitudes medias de FTI fueron menores (De Vloo et al., 2016; Fontes et al., 2006; Nasr et al., 2018; Picart et al., 2019; Pinto et al., 2002) y nuestras longitudes de FTE fueron mayores que las reportadas en otros estudios, pero dentro del rango general de estudios previos (De Vloo et al., 2016; Nasr et al., 2018; Picart et al., 2019; Tubbs et al., 2005). Algunas de estas diferencias podrían explicarse por las técnicas de medición o los distintos procesos de conservación aplicados. Pinto et al. (2002) abogan por el estudio de cadáveres frescos para evitar posibles distorsiones causadas por el proceso de embalsamamiento, aunque De Vloo et al. (2016) afirmaron que los resultados observados en cadáveres frescos y embalsamados podrían ser comparables.

En consonancia con los resultados de otros estudios (De Vloo et al., 2016; Picart et al., 2019; Pinto et al., 2002), no pudimos identificar ninguna correlación significativa entre las longitudes de FTE y los niveles de DS. Nuestros resultados arrojaron conclusiones similares a estudios anteriores (De Vloo et al., 2016; Picart et al., 2019), ya que no descubrimos ninguna correlación entre las longitudes de FTI y las longitudes de FTE. Varios autores (De Vloo et al., 2016; Fontes et al., 2006; Nasr et al., 2018; Picart et al., 2019) han informado valores similares a nuestro estudio para todos los diámetros de FTI. Identificamos fuertes correlaciones entre FTI-D1 y todos los demás diámetros de FTI, pero no entre los diámetros de FTE, excepto los diámetros de FTE proximal y medio; Por lo tanto, el primer segmento del FTI se puede utilizar para predecir el ancho de otros diámetros del FTI.

4.3 Principales hallazgos

El FTI se describe con forma piramidal y el FTE con forma de reloj de arena; sin embargo, estas descripciones no son del todo precisas. Nuestra evidencia muestra que el diámetro distal del FTI puede ser mayor en un punto entre el punto medio y su fusión con el DS, donde se ensancha caudalmente. El diámetro proximal del FTE es mayor que el diámetro distal del FTI, lo que indica que el FT se ensancha antes y después de la fusión FTI-DS, una característica que, hasta donde sabemos, no se ha descrito previamente.

Decidimos reanalizar las características macroscópicas del FT completo para nuestro estudio, examinando la forma, la superficie, el contraste entre CM y FTI, así como la movilidad y la tensión (Picart et al., 2019). Nuestros hallazgos no concuerdan con los de otros estudios (De Vloo et al., 2016), ya que observamos que el FT no presenta un tono más brillante que las raíces CE circundantes.

Además, observamos que el FTI tendía a tener una forma más irregular que el FTE. Las formas generales del FTI y el FTE son sustancialmente diferentes, siendo el FTI más filiforme o

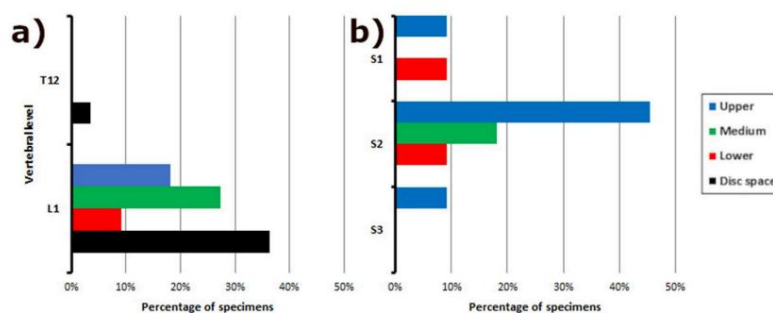


FIGURA 7

Distribución de frecuencias de los niveles vertebrales en relación con la anatomía del filum terminale. Gráfico de barras que ilustra la distribución de los niveles vertebrales asociados con: (a) la unión del cono medular y el filum terminale interno; (b) la fusión entre el saco dural y el filum terminale externo.

Estos datos proporcionan información sobre la variabilidad de estos puntos de referencia anatómicos clave a lo largo de la columna vertebral.

filiformes, mientras que la mayoría de los FTE eran más planos en la mayoría de los especímenes (aunque aún queda por determinar la relevancia biomecánica de esto).

4.4 El ETP “inexplorado”

Históricamente, se ha descrito que la inserción distal del FTE ocurre en el periostio coccígeo. Muy pocos autores mencionan que ocurre específicamente en Cx1 (Picart et al., 2019).

Sin embargo, se observó una inserción distal en Cx2 para algunos especímenes de FTE. La inserción de FTE fue morfológicamente variable. Se observaron de una a cuatro hebras de FTE insertadas en el periostio coccígeo, a veces en masa, como una sola hebra gruesa, en forma de Y, o incluso triangular o piramidal, como lo describieron Picart et al. (2019). Un pequeño plexo venoso (Figura 6) puede acompañar al FTE, principalmente en la parte distal, en su inserción en el periostio coccígeo. Esto no se ha descrito previamente en la literatura, ni se ha reportado ningún plexo venoso relacionado exclusivamente con esta área, ni se ha explicado su relevancia anatómica.

4.5 Consideraciones operativas

Las diferencias entre los parámetros FT en cadáveres frescos y embalsamados no se han estudiado ni comparado ampliamente, y sugerimos que esta es una cuestión importante que debe abordarse; si bien la edad puede influir en las comparaciones de la longitud de FT, su efecto sobre los parámetros medidos en adultos humanos también sigue siendo poco claro. Las variaciones en las técnicas de medición y los métodos de conservación pueden contribuir a discrepancias en los resultados; sin embargo, la evidencia disponible no es concluyente. Si bien algunos estudios han reportado diferencias, estas inconsistencias no se observan de manera uniforme en todas las mediciones, como se demuestra en el presente estudio.

La posición prona del cadáver durante las mediciones in situ, las diferencias entre las evaluaciones in situ y ex vivo, y las dificultades para determinar, microscópicamente y macroscópicamente, el final del CM y el inicio del FTI (CM-FTI), el final del FTE en su fusión con el DS (DS-FTE) y el inicio del FTE son parámetros a considerar. La dificultad para diseccionar el FTE completo, ya que puede adherirse al dorso sacro, es un problema que a menudo se pasa por alto en las técnicas de disección de FT.

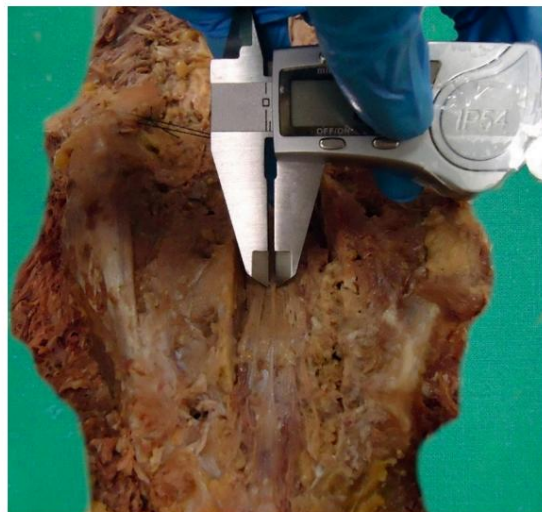


FIGURA 8

Medición con calibrador de los diámetros del filum terminale externum. Ilustración detallada del uso del calibrador para medir los diámetros del filum terminale externum.

4.6 Recomendaciones

Uno de nuestros objetivos fue establecer un protocolo básico para futuros estudios morfométricos cadavéricos del FT (Tabla Suplementaria 1). Sugerimos medir el FT y determinar los segmentos vertebrales CM-FTI y DS in situ, según el método descrito por Hansasuta et al. (1999). Recomendamos caracterizar los aspectos macroscópicos, la forma, la superficie, la tensión y la movilidad, el número de hebras distales del FTE y la inserción perióstica distal del FTE in situ según nuestro protocolo. También se recomienda que las mediciones in situ y ex vivo de las longitudes de FT, FTI y FTE, y de los diámetros de FTI y FTE, como describen De Vloo et al. (2016), formen parte de este protocolo (Figuras 4, 8). Estas directrices deberían facilitar un enfoque más uniforme y proporcionar datos morfológicos comparables para esta compleja estructura. Una comprensión más profunda del filum terminale (FT) y sus variaciones anatómicas tiene el potencial de influir significativamente en las prácticas clínicas y las técnicas quirúrgicas, en particular en neurocirugía e intervenciones relacionadas con la columna.

4.7 Futuro

Los futuros esfuerzos de investigación deben priorizar descripciones morfológicas, macroscópicas e histológicas integrales del FT para estandarizar las técnicas de disección en especímenes de cadáveres. Los parámetros de evaluación en entornos ex vivo e in situ, ya sea en cadáveres frescos o embalsamados, deben estandarizarse para garantizar la consistencia y la fiabilidad de los estudios. Un debate sobre los efectos del embalsamamiento podría mitigar posibles sesgos. Vincular las variaciones anatómicas con los resultados clínicos o biomecánicos podría aumentar la relevancia de los hallazgos. La adopción y validación de este protocolo morfométrico estandarizado propuesto podría fortalecer su impacto. Los estudios de imagen y los estudios in vivo podrían mejorar significativamente nuestra comprensión del FT y su variabilidad anatómica.

4.8 Limitaciones

Este estudio cadavérico tiene varias limitaciones, incluido un tamaño de muestra modesto, que puede no capturar completamente la variabilidad anatómica, y el uso de cadáveres embalsamados de edad avanzada, que pueden no representar con precisión las características morfométricas de otras poblaciones. Además, el embalsamamiento puede causar contracción del tejido en comparación con las muestras frescas, lo que podría afectar las mediciones. También debemos considerar el tiempo transcurrido entre el proceso de embalsamamiento y la evaluación, la posición del cadáver y las dificultades inherentes a la replicación de las características biomecánicas y funcionales en vivo. Datos recientes de cadáveres o una discusión más detallada sobre los efectos del embalsamamiento podrían mitigar posibles sesgos en estudios futuros. El reto actual es correlacionar eficazmente los hallazgos anatómicos con las patologías médicas y quirúrgicas.

5 Conclusión e importancia del estudio del filum terminale

El FT, un segmento a menudo eclipsado en los estudios de la médula espinal, presenta una mayor variabilidad de la previamente reconocida. Los aspectos vasculares del FT se han pasado por alto en gran medida y merecen un estudio más profundo. Hasta donde sabemos, este es el primer artículo en el que se describe un plexo venoso en la parte más distal del FTE, las vértebras coccigeas. Además, en este artículo, se detallan características previamente no documentadas de la inserción coccígea del FTE.

Debido a la considerable variación en los métodos utilizados para diseccionar el filum terminale, proponemos un protocolo de disección para evaluarlo, sentando las bases para futuras investigaciones. Esto es particularmente importante dada la relevancia clínica del filum terminale en patologías espinales como el síndrome de médula anclada, los trastornos neurovasculares y su posible papel como nicho progenitor neural atípico. Se justifica un mayor estudio del filum terminale, dadas las preguntas sin resolver derivadas de la variabilidad en investigaciones previas y su relevancia crucial en diversos contextos clínicos, en particular para cirujanos de columna, neurólogos y otros especialistas que tratan patologías relacionadas con el filum terminale. Esperamos que este estudio contribuya a una comprensión más profunda del filum terminale y sus implicaciones clínicas.

reduce la brecha entre los segmentos anatómicos poco estudiados, como el filum terminale, y la práctica clínica y la atención al paciente.

Declaración de disponibilidad de datos

Los datos brutos que sustentan las conclusiones de este artículo serán puesto a disposición por los autores, sin reservas indebidas.

Declaración de ética

Todos los cadáveres fueron donados con fines de investigación médica y científica, y se obtuvo el consentimiento informado de los donantes o sus representantes legales. El Comité de Ética de Experimentación Humana de la Universitat Autònoma de Barcelona otorgó la aprobación ética para este estudio (Procedimiento 2904, aprobado el 27/03/2015). Los estudios se llevaron a cabo de acuerdo con la legislación local y los requisitos institucionales. Los participantes dieron su consentimiento informado por escrito para participar en este estudio.

Contribuciones del autor

EB-O: Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Redacción (borrador original), Redacción (revisión y edición). MO-S: Conceptualización, Curación de datos, Metodología, Recursos, Supervisión, Redacción (revisión y edición). MR-S: Metodología, Recursos, Redacción (revisión y edición). AR-B: Conceptualización, Investigación, Metodología, Recursos, Supervisión, Redacción (revisión y edición).

Fondos

Los autores declaran que no recibieron apoyo financiero para la investigación y/o publicación de este artículo.

Expresiones de gratitud

Queremos expresar nuestro sincero agradecimiento al equipo del laboratorio de disección de la Universitat Autònoma de Barcelona por su inestimable ayuda y dedicación a lo largo de este estudio. Su experiencia, apoyo y compromiso con la excelencia fueron fundamentales para el éxito de esta investigación.

Incompatibilidad

Los autores declaran que la investigación se llevó a cabo en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un posible conflicto de intereses.

Declaración de IA generativa

Los autores declaran que no se utilizó IA generativa en la creación de este manuscrito.

Nota del editor

Todas las afirmaciones expresadas en este artículo son únicamente de los autores y no representan necesariamente las de sus organizaciones afiliadas, ni las del editor, los editores y la

Referencias

- Abdulrazeq, H., Leary, O., Tang, O., Karimi, H., McElroy, A., Gokaslan, Z., et al. (2023). Histopatología quirúrgica del filum terminale: Hallazgos de una amplia serie de pacientes con síndrome de médula anclada. *J. Clin. Med.* 13:6. doi: 10.3390/jcm13010006 Arvidsson, L., Fagerlund, M., Jaff, N.,
- Ossoinak, A., Jansson, K., Hägerstrand, A., et al. (2011). Distribución y caracterización de células progenitoras dentro del filum terminale humano. *PLoS One* 6:e27393. doi: 10.1371/journal.pone.0027393
- Balodis, A., Nevercika, V., Zavertjajeva, M., Mikijanskis, R., Kalnina, M., Breikša- Vaivode, A., et al. (2024). Ependimoma mixopapilar gigante con metástasis multisituadas en el eje neural: Un caso raro con pronóstico subóptimo. *Am. J. Case Rep.* 25:e942392. doi: 10.12659/AJCR.942392
- Cai, Y., Wang, R., Wang, J., Zhan, Q., Wei, M., Xiao, B., et al. (2024). Discrepancia en las respuestas electromiográficas activadas entre el filum graso y el filum terminal normal. *BMC Surg.* 24:60. doi: 10.1186/s12893-024-02351-0
- Chern, J., Dauser, R., Whitehead, W., Curry, D., Luerssen, T. y Jea, A. (2011). El efecto de la liberación de la médula anclada en el equilibrio espinal coronal en el filum terminale tenso. *Spine (Phila, Pensilvania, 1976)* 36, E944–E949. doi: 10.1097/BRS.0b013e318181fc2edd
- Chrenek, R., Magnotti, L., Herrera, G., Jha, R., y Cardozo, D. (2017). Caracterización del filum terminale como nicho de células progenitoras neuronales en ratas y humanos. *J. Comp. Neurol.* 525, 661–675. doi: 10.1002/cne.24094
- Dauber, W., Feneis, H., and Spitzer, G. (2021). *Feneis Nomenclatura Anatómica Ilustrada*. Barcelona: Elsevier.
- De Vloo, P., Monea, A., Sciôt, R., van Loon, J. y Van Calenberg, F. (2016). El filum terminale: Un estudio cadavérico de anatomía, histología y propiedades elásticas. *World Neurosurg.* 90, 565–573.e1. doi: 10.1016/j.wneu.2015.12.103.
- Dharanipathy, S., Gurjar, H. y Kumar, A. (2023). Signo de renacuajo en el filum terminale paragangliomas. *Neurocirugía Mundial.* 175, 76–77. doi: 10.1016/j.wneu.2023.03.133
- Djindjian, M., Ribeiro, A., Ortega, E., Gaston, A. y Poirier, J. (1988). La vascularización normal del filum terminal intradural en el ser humano. *Surg. Radiol. Anat.* 10, 201–209. doi: 10.1007/BF02115238
- Fluss, R., Lo Bu, R., Kobets, AJ, y Gomez, JA (2024). Los paradigmas terapéuticos complejos para la médula anclada y la escoliosis concomitantes: Caso ilustrativo. *J. Neurosurg. Lecciones de caso 7:CASE23574*. doi: 10.3171/CASE23574
- Fontes, R., Saad, F., Soares, M., de Oliveira, F., Pinto, F., y Liberti, E. (2006). Estudio ultraestructural del filum terminale y sus fibras elásticas. *Neurocirugía* 58, 978–984. doi: 10.1227/01.NEU.0000210224.54816.40
- Guo, Y., y Yu, J. (2023). Tratamiento de las fistulas arteriovenosas piales del filum terminale en la región sacra: Reporte de un caso y revisión sistemática. *Neuroradiol. J.* 36, 251–258. doi: 10.1177/19714009221126017
- Hansasuta, A., Tubbs, R. y Oakes, W. (1999). Fusión del filum terminale y terminación del saco dural: Estudio en 27 cadáveres. *Pediatr. Neurosurg.* 30, 176–179. doi: 10.1159/000028790
- Harmeier, J. (1933). Histología normal del filum terminale intradural. *Arch. Neurol. Psiquiatría* 29:308.
- lampreechakul, P., Wangtanaphat, K., Angsusing, C., Wattanasen, Y., Lertbutsayanukul, P., Thammachantha, S., et al. (2022). Fistula arteriovenosa dural sacra del filum terminal coexistente con una vena del filum parcialmente trombosa: Reporte de un caso y revisión de la literatura. *Surg. Neurol. Int.* 13:78. doi: 10.25259/SNI_980_2021
- Jiang, Q., Tao, B., Gao, G., Sun, M., Wang, H., Li, J., et al. (2022). Filum terminale: Una revisión exhaustiva con consideraciones anatómicas, patológicas y quirúrgicas. *Neurocirugía Mundial.* 164, 167–176. doi: 10.1016/j.wneu.2022.04.098 Klinge,
- P., McElroy, A., Leary, O., Donahue, J., Mumford, A., Brinker, T., et al. (2022). No solo un ancla: el filum terminale humano contiene fibras sensibles al estiramiento.

Revisores. El editor no garantiza ni avala ningún producto evaluado en este artículo ni ninguna afirmación de su fabricante.

Material complementario

El material complementario de este artículo se puede encontrar en línea en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnana.2025.1547165/full#supplementary-material>

y terminaciones nerviosas nociceptivas, y responde a la estimulación eléctrica con activación muscular paraespinal. *Neurocirugía* 91, 618–624. doi: 10.1227/neu.0000000000002081

Kouhen, F., Mjabbar, R., Alami, R., El Gouch, H., Cherkaoui Jaouad, M., Benslim, N., et al. (2024). Localización inusual de ependimoma mixopapilar en el sacro: Reporte de un caso y revisión de la literatura. *Radiol. Caso Rep. Rev.* 19, 1489–1495. doi: 10.1016/j.radcr.2023.12.010

Li, J., Zhang, J. y Guan, X. (2016). Estudio mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) del filum terminale de un feto humano. *Int. J. Clin. Exp. Med.* 9, 3118–3124.

Lim, S., Choi, I. y David, C. (2011). Fistulas arteriovenosas espinales del filum terminales. *AJNR Am. J. Neuroradiol.* 32, 1846–1850. doi: 10.3174/ajnr.A2612

Miyagami, T., Nojiri, H., Okada, S., Mitsumoto, K., Uemura, K. y Naito, T. (2024). Presentación atípica de filum terminale estrecho con hernia discal torácica: Reporte de un caso. *J. Med. Case Rep.* 18:69. doi: 10.1186/s13256-024-04371-z

Nakano, N., Kanekiyo, K., Yamada, Y., Tamachi, M., Suzuki, Y., Fukushima, M., et al. (2019). Estructuras del filum terminale y características de las células ependimarias de su canal central en ratas. *Res. Cerebral.* 1707, 208–215. doi: 10.1016/brainres. 038

Namba, K. (2016). Anatomía vascular de la cola de caballo y su implicación en las lesiones vasculares de la estructura espinal caudal. *Neurol. Med. Chir (Tokio).* 56, 310–316. doi: 10.2176/nmc.ra.2016-0006

Nasr, A., Hussein, A. y Zaghoul, S. (2018). Parámetros morfométricos y estudio histológico del filum terminale de cadáveres humanos adultos e imágenes de resonancia magnética. *Folia Morphol (Warsz).* 77, 609–619. doi: 10.5603/FM.a2018.0041

Ota, T. (2023). Anatomía vascular funcional y derivaciones arteriovenosas de la columna vertebral. *Semin. Neurol.* 43, 356–369. doi: 10.1055/s-0043-1771209

Otto, N., Kucera, J., Hayes, L. y Chandra, T. (2023). Síndrome de médula anclada: Influencia de los hallazgos de imagen en la toma de decisiones quirúrgicas. *Cureus* 15:e44854. doi: 10.7759/cureus.44854

Picart, T., Barritault, M., Simon, E., Robinson, P., Barrey, J., Meyronet, D., et al. (2019). Análisis anatómico e histológico de una estructura compleja considerada durante mucho tiempo como un simple ligamento: el filum terminale. *Neurocirugía mundial.* 129, e464–e471. doi: 10.1016/j.wneu.2019.05.184

Pinto, F. C., Fontes, RB, Leonhardt Mde, C., Amodio, DT, Porro, FF y Machado, J. (2002). Estudio anatómico del filum terminale y sus correlaciones con el síndrome de médula anclada. *Neurocirugía* 51:725–729; discusión 729–730.

Pokanan, S., Borsu, H. y Hansasuta, A. (2020). Terminación del saco dural espinal y fusión del filum terminale interno: Un estudio de 80 cadáveres. *Clin. Anat.* 33, 558–561. doi: 10.1002/ca.23438

Popov, H., Pavlov, P. y Stoyanov, G. (2023). Tumor neuroendocrino de la cola de caballo: Informe histopatológico de un caso. *Cureus* 15:e48427. doi: 10.7759/cureus.48427

Rojas, S., Ortega, M. y Rodríguez-Baeza, A. (2018). Configuraciones vasculares de la canasta anastomótica del cono medular en la médula espinal humana. *Clin. Anat.* 31, 441–448. doi: 10.1002/ca.22986

Rouvière, H., Delmas, A., y Götzens García, V. (2009). *Anatomía humana: Descriptiva, Topográfica y Funcional*. Masson: Barcelona.

Royo-Salvador, M., Fiallos-Rivera, M., y Villavicencio, P. (2024). Síndrome neurocráneo-vertebral relacionado con la luxación coccígea: Un estudio preliminar. *World Neurosurg.* X 21:100252. doi: 10.1016/j.wnsx.2023.100252

Royo-Salvador, M., Fiallos-Rivera, M., Salca, H. y Ollé-Fortuny, G. (2020). La enfermedad del filum y el síndrome neurocráneo-vertebral: Definición, cuadro clínico y características de imagen. *BMC Neurol.* 20:175. doi: 10.1186/s12883-020-01743-y

- Saker, E., Henry, B., Tomaszewski, K., Loukas, M., Iwanaga, J., Oskouian, R., et al. (2017). El peroné terminal interno y externo: una revisión exhaustiva. *J. Clin. Neurociencia*. 40, 6–13. doi: 10.1016/j.jocn.2016.12.020
- Schmolling, ÁH., Bodani, V., Jaroengarmsamer, T., Andrade-Barazarte, H., Radovanovic, I. y Krings, T. (2023). Consideraciones anatómicas sobre una fistula arteriovenosa de alto flujo por debajo del cono medular en un paciente con telangiectasia hemorrágica hereditaria: Reporte de caso. *Interv. Neuroradiol.* doi: 10.1177/15910199231196458 En línea antes de imprimir.
- Standring, S. (2021). *Anatomía de Gray: Bases anatómicas de la práctica clínica*, cuadragésima segunda edición. Amsterdam: Elsevier.
- Tubbs, R., Murphy, R., Kelly, D., Lott, R., Salter, E. y Oakes, W. (2005). El filum terminal externo. *J. Neurocirugía*. Columna 3, 149–152. doi: 10.3171/spi.2005.3.2.0149
- Tubbs, R., Shoja, M. y Loukas, M. (2016). *Enciclopedia completa de Bergman sobre la variación anatómica humana*. Hoboken, Nueva Jersey: John Wiley & Sons.
- Varghese, M., Olstorn, H., Murrell, W. y Langmoen, I. (2010). Exploración de localizaciones atípicas de células madre neurales de mamíferos: El filum terminale humano. *Arch. Ital. Biol.* 148, 85–94.
- Yamada, S. (2016). Carta al editor: Filum terminale en el síndrome de médula anclada. *J. Neurosurg. Pediatr.* 17, 634–636. doi: 10.3171/2015.4.PEDS15204
- Yamada, S., Won, D., Pezeshkpour, G., Yamada, B., Yamada, S., Siddiqi, J., et al. (2007). Fisiopatología del síndrome de médula anclada y trastornos complejos similares. *Neurocirujano. Enfoque* 23, 1–10. doi: 10.3171/FOC-07/08/E6
- Yamada, S., Won, D., Siddiqi, J. y Yamada, S. (2004). Síndrome de médula anclada: Resumen del diagnóstico y tratamiento. *Neurol. Res.* 26, 719–721. doi: 10.1179/016164104225017947
- Zhu, J., Zhu, W., Li, M., Wei, X., Chen, Z. y Li, Y. (2023). Características de las fistulas arteriovenosas durales lumbosacras en la resonancia magnética. *Front. Neurol.* 14:1157902. doi: 10.3389/fneur.2023.1157902