

# Anatomía del tracto corticoespinal y su importancia en la resección de cavernomas pontinos

Axel Colombo,<sup>1</sup> Gonzalo Bonilla,<sup>1</sup> Valeria Trofa,<sup>1</sup> Juan Ignacio Navarro,<sup>1</sup>  
Andrés Cervio,<sup>2</sup> Facundo Villamil<sup>1</sup>

1. Laboratorio de Neuroanatomía, III Cátedra de Anatomía, Universidad de Buenos Aires, Ciudad de Buenos Aires, Argentina

2. Departamento de Neurocirugía, Fundación para la Lucha contra las Enfermedades Neurológicas de la Infancia (FLENI), Ciudad de Buenos Aires, Argentina

## RESUMEN

**Introducción:** la resección quirúrgica de los cavernomas pontinos representa un desafío debido a la densidad de estructuras neurales críticas en esta región, entre ellas el tracto corticoespinal (TCE).

**Objetivos:** realizar una descripción detallada del trayecto del TCE en disecciones y tractografías, con el fin de definir parámetros anatómicos que permitan evitar lesiones de dicho tracto durante la cirugía de la protuberancia.

**Material y método:** se realizaron tractografías con el *software* DSI Studio en 1065 cerebros de sujetos sanos pertenecientes al Human Connectome Project para ilustrar el TCE. Se disecaron 6 troncos del encéfalo con instrumental microquirúrgico y el método Klingler.

**Resultado:** en las tractografías, las fibras del TCE se encontraban ventralmente relacionadas con el estrato superficial de las fibras ESTP y dorsalmente con el EPTP, separadas de la calota de la protuberancia por el LM. Relaciones del TCE en disecciones: hacia ventral, se resecó entre 1.1-2 mm del ESTP. Hacia lateral, se identificó el EMTP y se realizó una resección hasta el origen aparente del NC V, localizado a una distancia de 3.9-4.1 mm del TCE, la disección profunda permitió ubicar el núcleo espinal trigemino a una profundidad de 10.2-12.4 mm. Hacia dorsal, se identificó el EPTP que separaba las fibras piramidales del LM.

**Conclusión:** los hallazgos obtenidos permiten definir parámetros anatómicos concretos como referencias quirúrgicas clave. La disposición de fibras transversas pueden ser utilizados durante la planificación y ejecución de abordajes quirúrgicos pontinos.

**Palabras clave:** Cavernoma pontino. Corticoespinal. Disección. Tractografía

## Anatomy of the corticospinal tract and its importance in the resection of pontine cavernomas

### ABSTRACT

**Background:** surgical resection of pontine cavernomas presents a challenge due to the density of critical neural structures in this region, including the corticospinal tract.

**Objectives:** to provide a detailed description of the corticospinal tract's course using dissections and tractography, in order to define anatomical parameters that allow for the avoidance of injury to this tract during pontine surgery.

**Methods:** tractography was performed using DSI Studio software on 1065 brains from healthy subjects belonging to the Human Connectome Project to illustrate the corticospinal tract. Six brainstems were designed using microsurgical instruments and the Klingler method.

**Results:** in the tractography, the TCE fibers were found ventrally related to the superficial layer of the ESTP fibers and dorsally to the EPTP, separated from the pontine tegmentum by the LM. Relationships of the TCE in dissections: ventrally, 1.1-2 mm of the ESTP was resected. Laterally, the EMTP was identified, and a resection was performed to the apparent origin of CN V, located 3.9-4.1 mm from the TCE. Deep dissection allowed the spinal trigeminal nucleus to be located 10.2-12.4 mm deep. Dorsally, the EPTP was identified, separating the pyramidal fibers from the LM.

**Conclusion:** the results obtained allow for the definition of specific anatomical parameters as key surgical landmarks. The arrangement of transverse fibers can be used during the planning and execution of pontine surgical approaches.

**Keywords:** Corticospinal. Dissection. Pontine cavernoma. Tractography

Juan Ignacio Navarro

[juani.navarro99@gmail.com](mailto:juani.navarro99@gmail.com)

Recibido: 30/09/2025 Aceptado: 22/11/2025

DOI: 10.59156/revista.v39i04.787

Axel Colombo: [axelcolombo59@campus.fmed.uba.ar](mailto:axelcolombo59@campus.fmed.uba.ar)

Gonzalo Bonilla: [gonzab@yahoo.com](mailto:gonzab@yahoo.com)

Valeria Trofa: [val.trofa@gmail.com](mailto:val.trofa@gmail.com)

Andrés Cervio: [acervio@fleni.org.ar](mailto:acervio@fleni.org.ar)

Facundo Villamil: [villamilfacundo@gmail.com](mailto:villamilfacundo@gmail.com)

Los autores no declaran conflicto de interés

Los autores no declaran financiamiento.

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia CC BY-NC

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

## INTRODUCCIÓN

La resección quirúrgica de los cavernomas pontinos presenta desafíos únicos debido a la variedad de estructuras neurales críticas en esa región, entre ellas el tracto corticoespinal (TCE).

El TCE, componente fundamental del sistema piramidal y conexión directa entre la corteza cerebral y la médula espinal, es el principal responsable del control de movimientos voluntarios aislados y especializados, particularmente de la musculatura distal de las extremidades. Dada su relevancia funcional, una comprensión precisa de la anatomía del TCE a nivel de la protuberancia y sus relaciones con las estructuras circundantes resulta fundamental para planificar abordajes quirúrgicos seguros.

## OBJETIVOS

Realizar una descripción detallada del trayecto del TCE en preparados anatómicos y estudios de tractografía con el fin de definir parámetros anatómicos claros que permitan evitar lesiones de dicho tracto durante la cirugía de la protuberancia. Se describen 2 casos en los cuales el uso de estos parámetros anatómicos son útiles.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron tractografías con el *software* DSI Studio en 1065 cerebros de sujetos sanos pertenecientes al Human Connectome Project para ilustrar el TCE y analizar sus relaciones a nivel de la protuberancia del tronco del encéfalo. Se efectuaron también disecciones en 6 troncos del encéfalo *post mortem* con instrumental microquirúrgico y lupas de magnificación. Para la disección del TCE se utilizó el método Klingler, fijando las preparaciones en formalina al 10 % durante un mínimo de 3 meses.

Posteriormente, se extirparon las meninges y los vasos de la región ventral del tronco encefálico, las piezas se congelaron a -15 °C durante 15 días. Tras la descongelación, se retiraron las fibras del estrato superficial de las fibras transversas pontinas (ESTP) para evidenciar el TCE (Figura 1A). Continuando la disección, se retiraron las fibras del estrato medio de las fibras transversas pontinas (EMTP) y los núcleos pontinos, para evidenciar la disgregación de las fibras del TCE desde una vista sagital (Figura 1B). Finalmente, se retiró el estrato profundo de las fibras transversas pontinas (EPTP) para exponer al lemnisco medial (Figura 1C). Se realizó un corte axial para exponer todas las relaciones de las estructuras anteriormente mencionadas (Figura 1D).

Para la medición de las relaciones del TCE con estas estructuras se utilizó un calibre electrónico con sensibilidad de 0.1 mm. Además se analizó la base de datos del Instituto Fleni entre 2015 y 2020, y se recolectaron 2 casos de pacientes con cavernomas de tronco que fueron tratados quirúrgicamente.

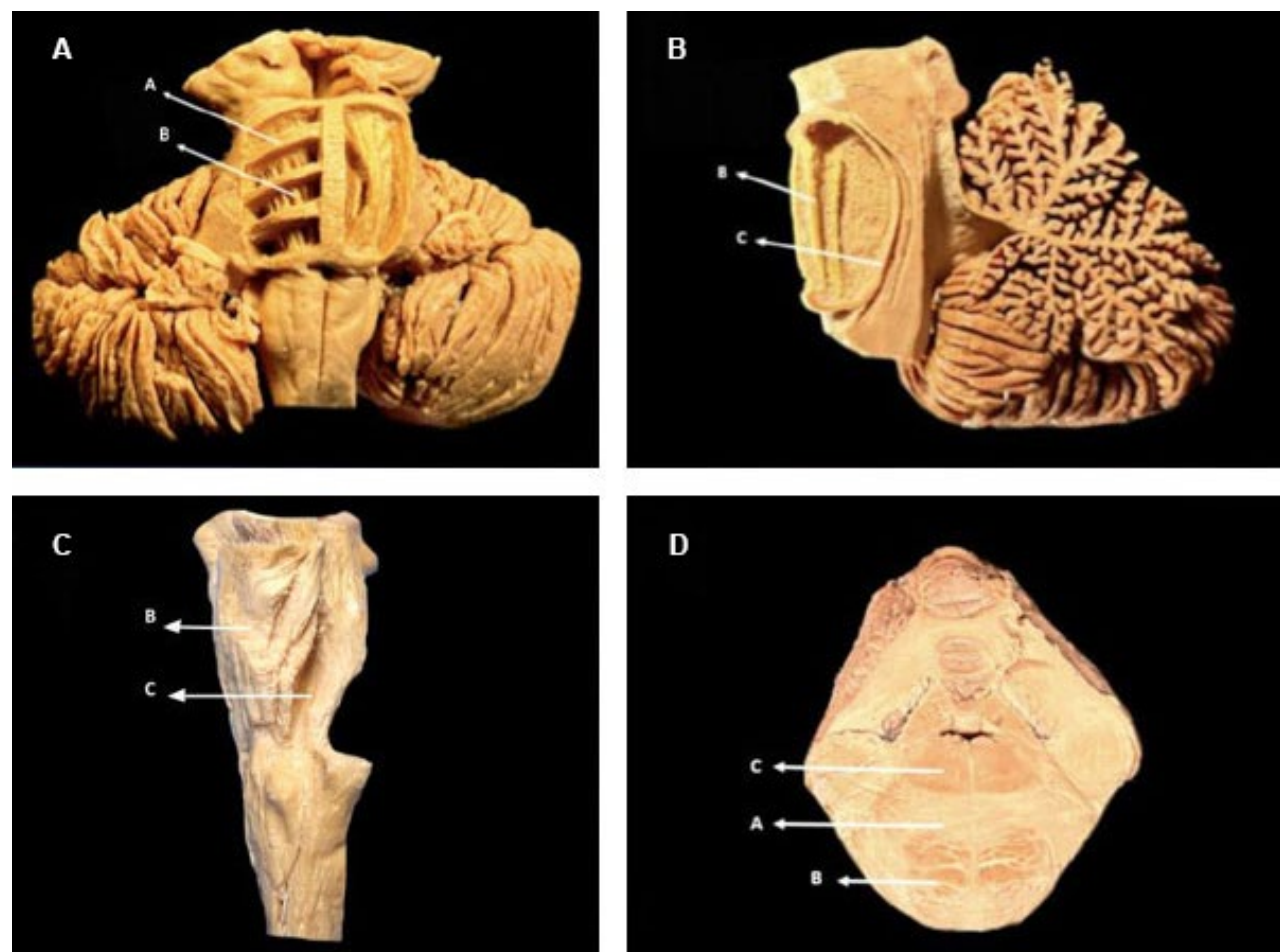


Figura 1. A) Vista ventral de la protuberancia. A: Estrato superficial fibras transversas pontinas. B: Tracto corticoespinal. B) Vista sagital de la protuberancia. B: Tracto corticoespinal. C: Lemnisco medial. C) Vista lateral izquierda protuberancia. B: Tracto corticoespinal. C: Lemnisco medial. D) Corte axial protuberancia. A: Estrato profundo fibras transversas pontinas. B: Tracto corticoespinal. C: Lemnisco medial.

## RESULTADOS

En las tractografías se visualizó la disposición de las fibras del tracto corticoespinal (TCE), ubicadas ventralmente en relación con el estrato superficial de las fibras transversas pontinas (ESTP) y dorsalmente con el estrato profundo (EPTP), separadas de la calota de la protuberancia por el lemnisco medial (LM) (Figura 2).

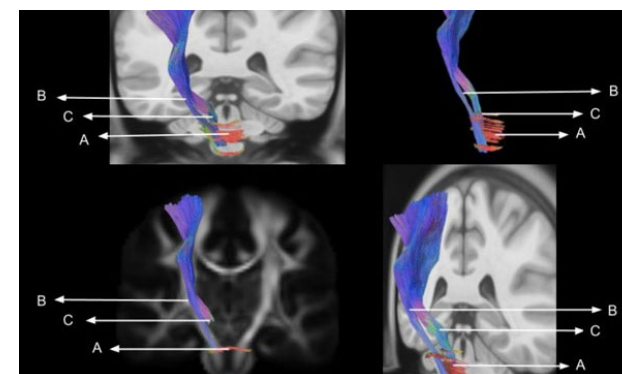


Figura 2. Tractografía. A: Fibras transversas pontinas. B: Tracto corticoespinal. C: Lemnisco medial.

El TCE fue disecado y se obtuvieron las siguientes relaciones: hacia ventral, se resecó entre 1.1 y 2 mm del ESTP; hacia lateral, se identificó el estrato medio de las fibras transversas pontinas (EMTP), que dividen las fibras del TCE en varios fascículos, y se realizó una resección hasta el origen aparente del nervio trigémino (NC V), localizado a una distancia de 3.9-4.1 mm del TCE. La disección profunda permitió ubicar el tracto y núcleo espinal trigeminal a una profundidad de 10.2-12.4 mm. Hacia dorsal, se identificó el EPTP, que separaba las fibras piramidales del LM; este presentaba su característica concavidad hacia ventral, con una distancia variable según la altura de la protuberancia en relación con el TCE. No se

identificaron tractos corticoespinales aberrantes. Sobre la base de estas relaciones se describieron 4 áreas de seguridad con respecto al TCE:

1. Área peritrigeminal entre los nervios trigémino y facial lateralmente, y el TCE hacia medial.
2. Área pontino lateral entre el espacio limitado por el origen aparente de los pares craneales V, VII y VIII.
3. Triángulo suprafacial ubicado superior al colículo facial en el espacio entre el fascículo longitudinal medial y el pedúnculo cerebeloso superior.
4. Triángulo infrafacial ubicado inferior al colículo facial entre los trigónos vagal y del hipogloso y el fascículo longitudinal medial.

### Casos ilustrativos

**Caso 1.** Paciente de sexo masculino de 27 años que consultó por cefaleas súbitas, seguidas de inestabilidad postural, paresia facial grado IV HB, diplopía en mirada extrema, hemiparesia BC derecha 3/5 y nistagmus. La RM evidenció imagen compatible con CTC protuberancial izquierdo con sangrado subagudo. Se realizó cirugía resectiva mediante abordaje del piso del IV ventrículo utilizando el triángulo suprafacial como SEZs. La evolución postoperatoria no mostró empeoramiento y al último seguimiento se objetivó mejoría del déficit motor y parcial de la paresia facial. La RM confirmó la resección total de la lesión (Figura 3).

**Caso 2.** Paciente de sexo femenino de 28 años que consultó por cuadro súbito de cefalea holocraneana, acompañado de parálisis facial periférica derecha House-Brackmann grado IV, asociada a acúfenos e hipoacusia severa de oído derecho. Se estudió con TC y RM de cerebro que evidenciaron imagen hiperdensa a nivel protuberancial derecho compatible con cavernoma con sangrado. Fue intervenida quirúrgicamente mediante craniectomía suboccipital retrosigmoidea utilizando la zona lateral pontina como punto de entrada, donde la lesión presentaba

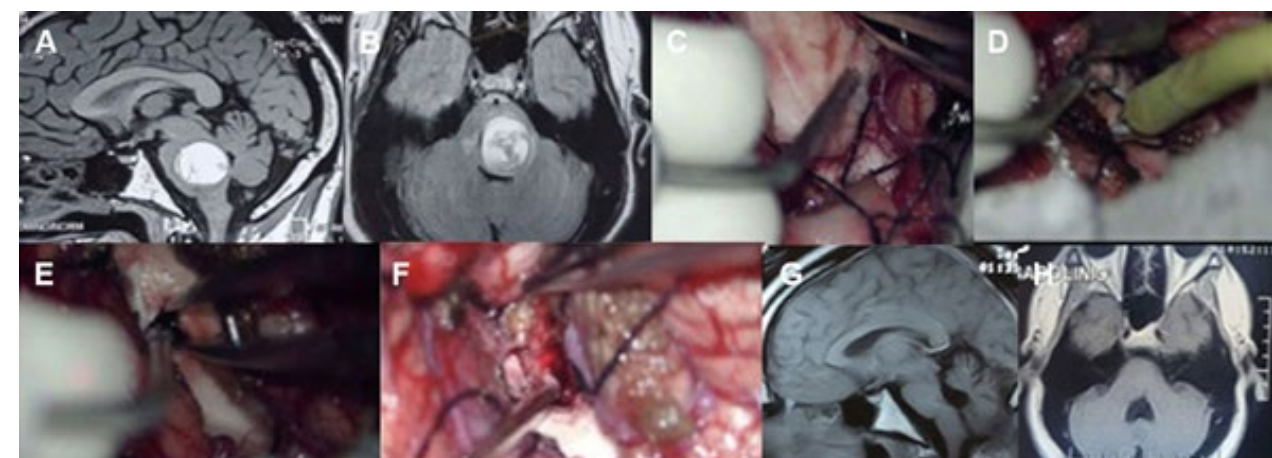


Figura 3. Ilustración de caso 1. A) RM secuencia T1 con contraste, corte sagital, se muestra cavernoma protuberancial con estigmas de sangrado subagudo. B) Corte axial con contraste. C) Imagen intraoperatoria visualizando el surco medio y estrias medulares del piso del IV ventrículo. D) Estimulación neurofisiológica del colículo facial. E) Apertura pial para evacuación de hematoma. F) Exéresis del cavernoma. G) RM postoperatoria, corte sagital T1 con contraste, mostrando ausencia de remanente lesional. H) Corte axial, secuencia T1.

expresión cortical a nivel de la emergencia del paquete facio acústico. La RM postoperatoria evidenció la resección completa respetando el plano gliótico/hemosiderínico circundante. Cursó el postoperatorio sin complicaciones ni empeoramiento del cuadro neurológico, egresando de la institución al quinto día. En el seguimiento ambulatorio presentó notable mejoría de la parálisis facial, pero persistencia de hipoacusia severa del oído derecho (Figuras 4 y 5).

## DISCUSIÓN

Los cavernomas de tronco son anomalías vasculares constituidas por capilares hialinos de bajo flujo y

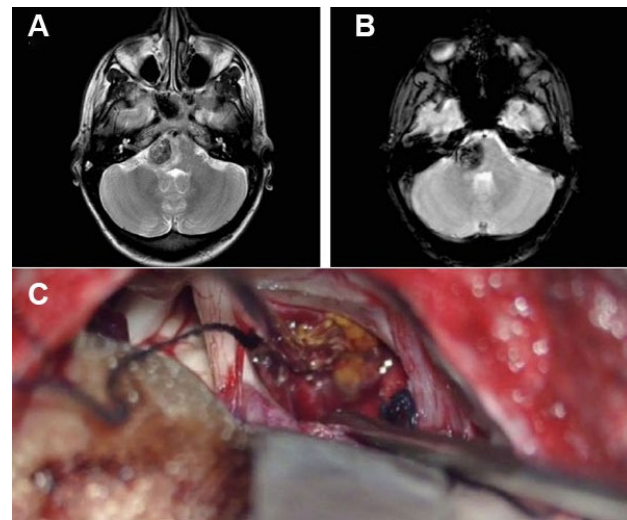


Figura 4. Ilustración caso 2. A) RM secuencia T2 axial evidenciando cavernoma protuberancial derecho con expresión pial. B) Secuencia SWAN. C) Imagen intraoperatoria.

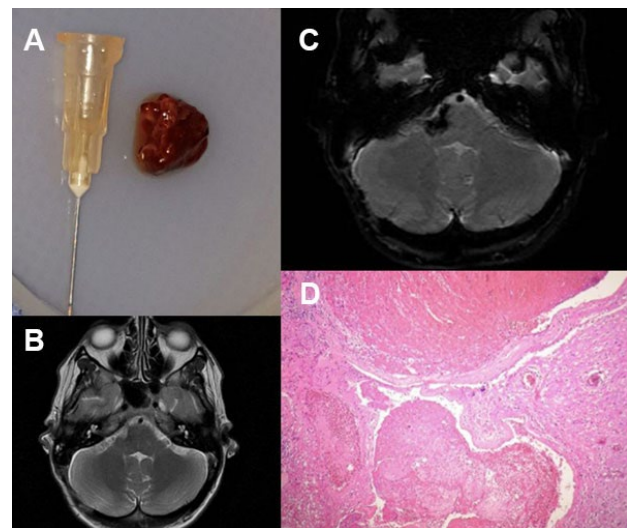


Figura 5. Ilustración caso 2. Histopatología y resonancia magnética. A) Pieza quirúrgica. B) RM postoperatoria, secuencia T2 axial, se muestra resección completa. C) Secuencia SWAN postoperatoria evidenciando remanente de halo de hemosiderina residual. D) Corte histológico H&E 20x que evidencia estructuras vasculares dilatadas y congestivas.

presión, sin tejido cerebral interpuesto. A causa de las microhemorragias y las trombosis, suelen estar rodeados por gliosis y depósitos de hemosiderina. Histológicamente carecen de la arquitectura de la pared de los vasos maduros y de la barrera hematoencefálica. Por este motivo, junto al hecho de tener tránsito lento a través de sus capilares displásicos, se consideran lesiones angiográficamente ocultas. Pueden localizarse en cualquier región del SNC y su presencia en el tronco encefálico oscila entre el 4 y el 35 %, siendo la protuberancia la localización más frecuente. La resección quirúrgica de los cavernomas en la protuberancia representa un desafío para el neurocirujano debido a su estrecha relación con múltiples estructuras elocuentes. Su tratamiento requiere un amplio conocimiento de la anatomía quirúrgica, asociado a destrezas quirúrgicas y tecnología para disminuir el riesgo de secuelas postoperatorias.<sup>(1-4)</sup> Por ello resulta fundamental conocer bien la anatomía de las estructuras que se encuentran en el puente del tronco encefálico. La disección y las tractografías constituyen herramientas muy útiles para estudiar las relaciones del tracto corticoespinal con el cavernoma.<sup>(5-7)</sup>

En la protuberancia se encuentran múltiples estructuras de alta complejidad, una de ellas es el tracto corticoespinal, que ingresa en la porción basilar de la protuberancia, donde se disgrega y discurre entre los núcleos pontinos. Estos últimos se ubican a lo largo de la porción ventral de la protuberancia y dan origen a las fibras transversas (pontocerebelosas) que se entrecruzan con las fibras longitudinales de proyección: corticoespinales, corticopontinas y corticobulbares.

La convexidad ventral de la porción basilar del puente guarda relación con la disposición de las fibras pontocerebelosas superficiales y profundas (transversas), densamente entrelazadas con las fibras longitudinales pontinas, que se continúan lateralmente para constituir los pedúnculos cerebelosos medios izquierdo y derecho.<sup>(8,9)</sup>

A este nivel del tronco encefálico, el TCE se encuentra cubierto ventralmente por el estrato superficial de las fibras transversas pontinas, y dividido en distintos fascículos por el estrato medio de dichas fibras (Figura 6). Hacia dorsal, las fibras del TCE se encuentran separadas del lemnisco medial por la ubicación del estrato profundo de las fibras transversas pontinas. Por encima del origen aparente de los nervios facial y vestibulococlear, el LM asciende paralelo y al lado de la línea media, para luego adoptar una trayectoria curvilínea en sentido lateral y oblicuo, semejante a un arco. Esta orientación se vuelve más evidente a la altura del origen aparente del nervio trigémino, donde a su vez comparte estrecha relación en su margen lateral con fibras del TCE y el comienzo del lemnisco lateral, en la porción ventrolateral del tegmento de la protuberancia.

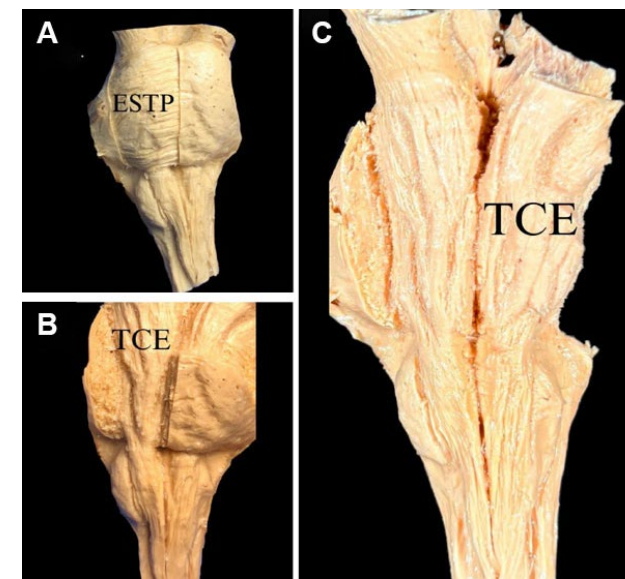


Figura 6. Vista ventral del tronco del encéfalo. A) ESTP (estrato superficial transversas pontinas). B y C) TCE (tracto corticoespinal).

Acompañando al TCE, en íntima relación, se encuentran las fibras corticobulbares, encargadas de la inervación de los núcleos motores de los pares craneales a lo largo del tronco encefálico: oculomotor, troclear, trigémino, abducens, facial, glossofaríngeo, vago, accesorio e hipogloso; así como la sustancia reticular, núcleo rojo y sustancia negra.<sup>(10-12)</sup> En la transición bulbopontina, el TCE se reagrupa para formar en la cara ventral del bulbo raquídeo las pirámides. El 80 % de las fibras del TCE, en especial aquellas cercanas la cisura media anterior, cruzan la línea media en la decusación piramidal a nivel de la porción caudal del bulbo y continúan hacia la médula espinal en la columna blanca contralateral como tracto corticoespinal lateral hasta hacer sinapsis en la columna gris anterior a esta (Figura 7A). Las fibras piramidales más laterales no se decusan en el bulbo, sino que descienden como el tracto corticoespinal anterior, que finalmente se decusa en la médula espinal a través de la comisura anterior para terminar en la columna gris anterior contralateral.

A nivel de la protuberancia, el TCE recibe irrigación de las ramas paramedianas de la arteria basilar. La oclusión o la rotura de estos vasos, o la lesión del TCE a nivel pontino, causa hemiplejía y signos de motoneurona superior en las extremidades contralaterales. El daño de las ramas paramedianas de la arteria basilar pueden afectar también al nervio *abducens* y al lemnisco medial, ocasionando una parálisis de motoneurona inferior del músculo recto lateral ipsilateral y pérdida contralateral de la sensibilidad vibratoria y de la discriminación táctil de dos puntos (epicrítico) de miembros superiores e inferiores.<sup>(13,14)</sup>

Se han descrito variaciones del TCE a nivel de la protuberancia, una de estas es el tracto corticoespinal

aberrante, que se desprende de un tronco en común del TCE y perfora el lemnisco medial para luego continuar su trayecto por el bulbo raquídeo. Se cree que su presencia mejora la recuperación motora en pacientes que hayan sufrido un accidente cerebrovascular.<sup>(15)</sup>

Para el tratamiento de los cavernomas del puente encefálico se emplean distintos abordajes cuyo fin es disminuir el daño a las estructuras anteriormente mencionadas.<sup>(16-19)</sup>

Los abordajes utilizados en la protuberancia son: el área peritrigeminal; el lateral pontino; el triángulo suprafacial y el triángulo infrafacial (Figuras 7B y 7C).

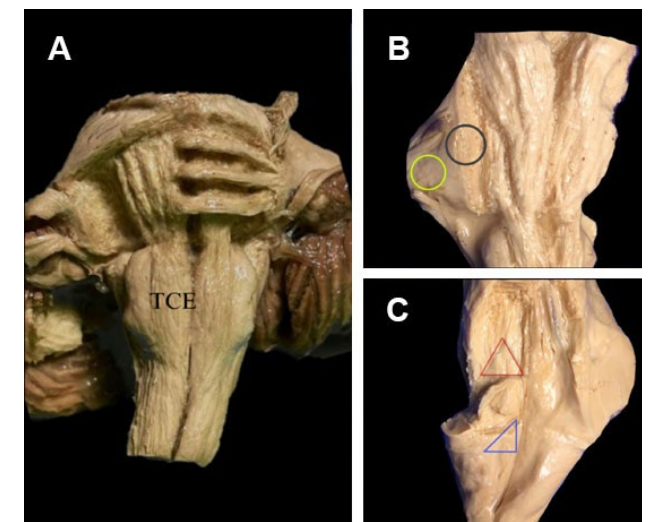


Figura 7. Disecciones del tronco del encéfalo. A) Vista ventral del tronco del encéfalo, se observa el TCE en su trayecto pontino y bulbar formando la decusación piramidal. B) Vista ventral del tronco encefálico. C) Vista dorsal del tronco encefálico.

### Acceso peritrigeminal

Se utiliza para lesiones de la región protuberancial ventral, alrededor del origen aparente del nervio trigémino. En este abordaje se realiza una incisión vertical que es perpendicular a las fibras transversas pontinas, entre los nervios trigémino y facial, y medial al trayecto de las fibras corticoespinales. A medida que avanza la disección en la porción anterolateral de la protuberancia, se identifican las fibras transversas pontocerebelosas superficiales y profundas, medialmente, al tracto corticoespinal desdoblado en distintos haces gruesos que transcurren de forma longitudinal interrumpidos y entrelazados con las fibras transversas, y lateralmente la emergencia del nervio trigémino, así como el origen del pedúnculo cerebeloso medio. Se toma como referencia un triángulo limitado medialmente por el TCE, lateralmente por el origen aparente del nervio trigémino y una línea vertical imaginaria que lo une con el origen aparente del nervio facial, y ventralmente por los núcleos sensitivo y motor del trigémino.

### Acceso pontino lateral

Se utiliza para lesiones que generan un desplazamiento ventral del TCE. Se toma como referencia el espacio comprendido entre la emergencia de los pares craneales V, VII y VIII. Permite acceder entre el TCE y el núcleo espinal del trigémino.

### Acceso triángulo suprafacial

Descrito como zona de acceso al interior de la protuberancia a través del suelo del IV ventrículo, tomando como referencia la posición del colículo facial. Este triángulo, ubicado superior al colículo facial, está conformado por las siguientes estructuras:

- Caudalmente, por el colículo facial.
- Medialmente, por el fascículo longitudinal medial.
- Lateralmente, por el pedúnculo cerebeloso superior.

### Acceso triángulo infrafacial

Este triángulo, ubicado inferior al colículo facial, está conformado por las siguientes estructuras: caudalmente, por los trógonos vagal y del hipogloso; medialmente, por el fascículo longitudinal medial; lateralmente, por el núcleo del nervio facial.

## CONCLUSIÓN

Este estudio hizo posible realizar una descripción detallada del trayecto y las relaciones anatómicas del tracto corticoespinal (TCE) en la protuberancia, combinando disecciones anatómicas y análisis tractográficos. También se dieron 2 ejemplos prácticos en los cuales se demuestra la utilidad de la anatomía para este tipo de abordajes.

Los hallazgos obtenidos permiten definir parámetros anatómicos concretos –como distancias desde referencias quirúrgicas clave y la disposición de fibras transversas– que pueden utilizarse durante la planificación y ejecución de abordajes quirúrgicos pontinos. Esta información es fundamental para reducir el riesgo de lesión del TCE en cirugías de cavernomas pontinos y, en consecuencia, contribuir a mejores resultados funcionales postoperatorios.

### Contribuciones de autoría

Conceptualización y Análisis formal: Juan Navarro. Curación de datos y Metodología: Valeria Trofa. Adquisición de fondos, Recursos y Validación: Gonzalo Bonilla. Investigación, Software y Redacción - borrador original: Axel Colombo. Administración del proyecto, Supervisión y Redacción - revisión y edición: Facundo Villamil. Visualización: Andrés Cervio.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Cervio A, Giovanini S, Nuñez M, Caffaratti G, Grijalba Romero M, Villamil F, y col. Tratamiento quirúrgico de los cavernomas de tronco cerebral. *Rev Latinoam Neurocir.* 2020;29(5):90-119.
2. Catapano JS, Rumalla K, Srinivasan VM, Lawrence PM, Keil KL, Lawton MT. A taxonomy for brainstem cavernous malformations: subtypes of medullary lesions. *J Neurosurg.* 2022;138(1):128-46.
3. Catapano JS, Rumalla K, Srinivasan VM, Lawrence PM, Keil KL, Lawton MT. A taxonomy for brainstem cavernous malformations: subtypes of midbrain lesions. *J Neurosurg.* 2021;136(6):1667-86.
4. Cantore G, Missori P, Santoro A. Cavernous angiomas of the brain stem. *Surg Neurol.* 1999;52:84-94.
5. Bello L, Castellano A, Fava E, Casaceli G, Riva M, Scotti G, et al. Intraoperative use of diffusion tensor imaging fiber tractography and subcortical mapping for resection of gliomas: technical considerations. *Neurosurg Focus.* 2010;28(2):E6.
6. Fernández-Miranda JC, Pathak S, Engh J, Jarbo K, Verstynen T, Yeh FC, y col. High-definition fiber tractography of the human brain: neuroanatomical validation and neurosurgical applications. *Neurosurgery.* 2012;71(2):430-53.
7. Maesawa S, Fujii M, Nakahara N, Watanabe T, Wakabayashi T, Yoshida J. Intraoperative tractography and motor evoked potential (MEP) monitoring in surgery for gliomas around the corticospinal tract. *World Neurosurg.* 2010;74(1):153-61.
8. Yagmurlu K, Rhoton AL Jr, Tanriover N, Bennett JA. Three-dimensional microsurgical anatomy and the safe entry zones of the brainstem. *Oper Neurosurg (Hagerstown).* 2014;10(4):602-20.
9. Berman JI, Berger MS, Mukherjee P, Henry RG. Diffusion-tensor imaging-guided tracking of fibers of the pyramidal tract combined with intraoperative cortical stimulation mapping in patients with gliomas. *J Neurosurg.* 2004;101(1):66-72.
10. Ordóñez-Rubiano EG. Anatomía microquirúrgica en 3D del tracto corticoespinal y de la vía del lemnisco basada en microdissección de fibras y demostración a través de tractografía. *Neurocirugía.* 2019;30(6):309-10.
11. Kovanlikaya I, Firat Z, Kovanlikaya A, Uluğ AM, Cihangiroglu MM, John M, y col. Assessment of the corticospinal tract alterations before and after resection of brainstem lesions using Diffusion Tensor Imaging (DTI) and tractography at 3T. *Eur J Radiol.* 2011;77(3):383-91.
12. Chenot Q, Tzourio-Mazoyer N, Rheault F, Descoteaux M, Crivello F, Zago L, y col. A population-based atlas of the human pyramidal tract in 410 healthy participants. *Brain Struct Funct.* 2019;224(2):599-612.
13. Recalde RJ, Figueiredo EG, de Oliveira E. Microsurgical anatomy of the safe entry zones on the anterolateral brainstem related to surgical approaches to cavernous malformations. *Oper Neurosurg (Hagerstown).* 2008;62(Suppl 3):9-17.

14. Yao Y, Ulrich NH, Guggenberger R, Alzarhani YA, Bertalanffy H, Kollias SS. Quantification of corticospinal tracts with diffusion tensor imaging in brainstem surgery: prognostic value in 14 consecutive 159 cases at 3T magnetic resonance imaging. *World Neurosurg.* 2015;83(6):1006-14.
15. Kwon HG, Son SM, Chang MC, Kim S, Kwon YH, Jang SH. Characteristics of the aberrant pyramidal tract in comparison with the pyramidal tract in the human brain. *BMC Neurosci.* 2011;12:108.
16. Benner D, Hendricks BK, Benet A, Graffeo CS, Scherschinski L, Srinivasan VM, y col. A system of anatomical triangles defining dissection routes to brainstem cavernous malformations: definitions and application to a cohort of 183 patients. *J Neurosurg.* 2022;138(3):768-84.
17. Ablá AA, Lekovic GP, Turner JD, de Oliveira JG, Porter R, Spetzler RF. Advances in the treatment and outcome of brainstem cavernous malformation surgery: a single-center case series of 300 surgically treated patients. *Neurosurgery.* 2011;68(2):403-14.
18. Vassal F, Schneider F, Nuti C. Intraoperative use of diffusion tensor imaging-based tractography for resection of gliomas located near the pyramidal tract: comparison with subcortical stimulation mapping and contribution to surgical outcomes. *Br J Neurosurg.* 2013;27(5):668-75.
19. Catapano JS, Rumalla K, Srinivasan VM, Lawrence PM, Keil KL, Lawton MT. A taxonomy for brainstem cavernous malformations: subtypes of pontine lesions. Part 1: basilar, peritrigeminal, and middle peduncular. *J Neurosurg.* 2022;137(5):1462-76.