

Instrumentación cervical en pacientes menores de 10 años

HARRYNSON E. SOTOMAYOR, RODRIGO REMONDINO, CARLOS TELLO, EDUARDO GALARETTO,
IDA FRANCHERI, ERNESTO BERSUSKY, MARIANO NOEL

*Servicio de Patología Espinal, Hospital Nacional de Pediatría "Prof. Dr. Juan P. Garrahan",
Ciudad Autónoma de Buenos Aires*

Recibido el 25-4-2016. Aceptado luego de la evaluación el 25-4-2017 • Dr. HARRYNSON E. SOTOMAYOR • hesb25@hotmail.com

RESUMEN

Introducción: La instrumentación de la columna cervical pediátrica ha ganado terreno en la última década. Las diferencias anatómicas y biomecánicas entre la columna cervical pediátrica y del adulto hacen que la cirugía requiera de una minuciosa preparación toda vez que se utilizan implantes diseñados para adultos. El objetivo de este estudio fue evaluar los resultados posoperatorios en una serie de niños <10 años sometidos a fusión cervical instrumentada, y describir la técnica quirúrgica y las complicaciones.

Materiales y Métodos: Se evaluó a 28 pacientes con patología cervical tratados con fusión instrumentada utilizando las técnicas descritas por Roy-Camille y Magerl para masas laterales, de Goel-Harms para C1-C2, y las fusiones occipito-cervicales con placas occipitales o rótulas. Los criterios de inclusión fueron: pacientes <10 años, cirugía primaria y un seguimiento mínimo de 2 años.

Resultados: La muestra incluyó 17 niñas y 11 niños, con un seguimiento promedio de 3.8 años (rango 2-10). La edad promedio fue de 6.1 años (rango 1.6-10). La tasa promedio de complicaciones generales fue del 32,1%. Los pacientes que tuvieron más complicaciones sufrían: síndromes genéticos [6 casos (21,4%)] y displasias esqueléticas [3 casos (10,7%)]. Trece tenían <6 años, 7 de ellos presentaron complicaciones (53,8%).

Conclusiones: La instrumentación cervical en pacientes <10 años demostró ser un procedimiento factible y seguro. Las displasias vertebrales, las anomalías congénitas y los síndromes genéticos, sumados al factor edad <6 años, son las principales variables asociadas a las complicaciones observadas.

Palabras clave: Artrodesis cervical; Pediatría; occipito-cervical; inestabilidad cervical.

Nivel de Evidencia: IV

CERVICAL INSTRUMENTATION AND FUSION IN CHILDREN UNDER 10 YEARS OLD

ABSTRACT

Introduction: Pediatric cervical spine implants and construction designs had rapidly evolved in the last decade. Anatomic and biomechanical differences between pediatric and adult cervical spine require a thorough preoperative planning, because these implants were originally designed for adults. The objective of this study was to assess the postoperative results of cervical instrumented fusion in children under 10 years old, and to describe the surgical technique and complications.

Methods: Twenty-eight children with different cervical pathology treated with instrumented fusion were evaluated. The following procedures were used: Roy-Camille's and Magerl's techniques for lateral masses, Goel-Harms' technique for C1-C2 fusion, and occipital-cervical fusion with occipital plates or screws. Inclusion criteria were: children under 10 years, no prior spine surgery, and minimum follow-up of 2 years.

Conflicto de intereses: Los autores no declaran conflictos de intereses.

Results: Sample included 17 girls and 11 boys, with a mean follow-up of 3.8 years (range 2-10). Mean age was 6.1 years (range: 1.6-10). Overall complication rate was 32.1%. The highest complication rates were associated with: genetic syndromes [6 cases (21.4%)], skeletal dysplasias [3 cases (10.7%)]. Thirteen patients were <6 years, 7 of them had complications (53.8%).

Conclusions: Cervical instrumented fusion in patients <10 years old proved to be a feasible and safe surgical procedure. Vertebral dysplasias, congenital, syndromic anomalies, and being younger than 6 years old are the main factors associated with high complication rates.

Key words: Cervical arthrodesis; pediatrics; occipito-cervical; cervical instability.

Level of Evidence: IV

Introducción

La instrumentación de la columna cervical en niños ha ido ganando terreno en la última década, se le atribuyen fijaciones más estables, altas tasas de fusión, menor tiempo de inmovilización externa y baja tasa de complicaciones asociadas.

Las diferencias anatómicas y biomecánicas entre la columna cervical del niño y del adulto determinan que la cirugía requiera de una minuciosa preparación, ya que los implantes están diseñados para adultos.

Existen numerosas técnicas de artrodesis occipito-cervicales, atlanto-axoideas y subaxiales,^{1,2} pero el advenimiento de los tornillos pediculares y de masas laterales^{3,4} ha superado los resultados obtenidos con las antiguas técnicas de alambros (Gallie, Sonntag, Brooks).^{5,6} No obstante, siguen ocurriendo complicaciones en muchas series, fundamentalmente asociadas a displasias vertebrales, pobre stock óseo, escasa cobertura de partes blandas e infecciones. Por ello, la instrumentación cervical en niños constituye un desafío para el cirujano espinal.

Se han publicado escasos reportes de pacientes pediátricos con instrumentación cervical.⁷ Varias publicaciones describen complicaciones relacionadas con los implantes en la población pediátrica hasta los 20 años de edad.⁸⁻¹¹

El objetivo de este estudio es describir las técnicas de instrumentación, los resultados y las complicaciones en una serie de pacientes <10 años tratados con instrumentación cervical (barras, tornillos y ganchos).

Materiales y Métodos

Se llevó a cabo un estudio retrospectivo de una serie consecutiva de 28 pacientes <10 años, con registros clínicos y radiográficos completos, y que sufrían una patología cervical que requirió instrumentación con ganchos y tornillos, entre 2003 y 2013, en un hospital de pediatría de alta complejidad.

Los criterios de inclusión fueron: pacientes <10 años con diversas patologías que requirieron, por primera vez, instrumentación cervical, con un seguimiento mínimo de dos años.

Los criterios de exclusión fueron: pacientes >10 años, antecedente de cirugía en la columna cervical relacionado

con artrodesis cervical simple, alambrado sublaminar o interespinoso, así como cifosis poslaminectomía.

Todos fueron evaluados con radiografías estáticas y funcionales, tomografía computarizada preoperatoria para detectar anomalías y variabilidades anatómicas, y para medir el tamaño de los pedículos C2 y C7, de masas laterales desde C1 hasta C6 y el espesor de la calota occipital.¹²⁻¹⁴

Se efectuó una resonancia magnética de rutina para valorar las compresiones estáticas y las inestabilidades; la angiorresonancia y la arteriografía selectiva se usaron ante la sospecha de compromiso de la arteria vertebral por causa tumoral, así también como de la permeabilidad y el flujo de las arterias.

Técnica quirúrgica

Para la fijación y el posicionamiento cefálico, se utilizó un halo; todos los pacientes estuvieron bajo monitoreo neurofisiológico desde el comienzo del procedimiento anestésico y se realizó un registro continuo hasta el posicionamiento final. Luego, se efectuó un control radiográfico para evaluar la posición de la cabeza y los ojos, respetar la lordosis cervical y valorar el ángulo occipito-cervical indispensable en las fusiones occipito-cervicales. En todas las fusiones, se utilizaron tornillos, ganchos, placas de soporte para vía anterior y barras cervicales.

Se utilizaron las técnicas descritas por Roy-Camille y Magerl¹⁵⁻¹⁷ para la colocación de tornillos a masas laterales, y la técnica descrita por Goel-Harms, para la estabilización C1-C2.¹ En las fusiones occipito-cervicales, se usaron placas occipitales o rótulas según el tamaño del paciente y la cobertura de partes blandas.¹⁸ Se utilizó injerto óseo local asociado a hueso autólogo de cresta ilíaca y aloinjerto de banco. Todos los pacientes utilizaron un halo chaleco durante tres meses luego de la cirugía.

El seguimiento posoperatorio incluyó controles clínico y radiográfico a las 6 semanas, a los 3 y 6 meses, y al año. Se evaluó la masa de fusión con radiografías estáticas a los tres meses de la cirugía, y cuando la visualización del callo óseo era mala, se recurrió a la tomografía computarizada antes de retirar el halo; en casos de dudas placas funcionales en flexo-extensión para descartar movilidad en el foco de artrodesis.

Las variables analizadas fueron: técnica quirúrgica, complicaciones intraoperatorias, complicaciones posquirúrgicas inmediatas, mediatas y tardías: lesiones vasculares, infecciones superficiales y profundas, rotura de meninges y fístula de líquido cefalorraquídeo, complicaciones neurológicas, retrasos de la consolidación y pseudoartrosis, mal posicionamiento de implantes, complicaciones relacionadas con los implantes.

Resultados

Se evaluó a 28 pacientes [17 niñas (60,71%), 11 niños (29,29%)] sometidos a artrodesis instrumentada cervical (Tabla 1), con un seguimiento promedio de 3.77 años (rango de 24 a 120 meses). La edad promedio era de 6.1 años (rango de 1.6 a 10).

Tabla 1. Datos demográficos

Paciente	Seguimiento (meses)	Seguimiento total	Sexo	Edad	Niveles de fusión
1	73	6+1 años	M	1+6 años	8
2	37	3+1 años	F	2+4 años	8
3	6	2+6 años	F	2+5 años	8
4	14	2+2 años	F	4+6 años	4
5	43	3+7 años	F	4+3 años	3
6	24	2 años	M	4 +11años	3
7	27	2+5 años	F	2+6 años	8
8	5	2+5 años	F	2+11 años	5
9	28	2+4 años	F	4+2 años	3
10	49	4+1 años	F	4+2 años	2
11	50	4+2 años	F	6+8 años	4
12	24	2 años	F	9+7 años	4
13	72	6 años	F	6+5 años	3
14	120	10 años	M	8+3 años	5
15	63	5+3 años	F	5+5 años	5
16	28	2+4 años	M	5+2 años	8
17	71	5+11 años	M	8+9 años	2
18	26	2+2 años	M	9+10 años	3
19	25	2+1 años	F	6 años	4
20	31	2+7 años	M	8+6 años	5
21	30	2+6 años	F	8+6 años	3
22	36	3 años	M	6 años	5
23	34	2+10 años	F	6+4 años	5
24	120	10 años	F	6+11 años	4
25	89	7+5 años	F	7+5 años	2
26	32	2+8 años	M	8 años	5
27	25	2+1 años	M	10 años	4
28	26	2+2 años	M	10 años	2
Porcentajes	1270/28: 45.35 meses	1270/12: 101.83/28:3.77 años	F: 17 M: 11	Rango de 1.6 a 10 años; media 6.13 años	125/28 4.46

Los diagnósticos de los pacientes operados eran: síndromes genéticos: Down (4 casos), Larsen (1 caso), Apert (1 caso), Klippel-Feil y asociación VACTERL (1 caso), neurofibromatosis 1 (2 casos), mucopolisacaridosis de tipo I (1 caso), de tipo IV (4 casos); displasias esqueléticas: displasia campomiélica (1 caso), acondroplasia (1 caso), condrodisplasia punctata (1 caso), disgenesia espinal (2 casos); causas traumáticas: fractura por arma de fuego (1 caso); tumores: quiste óseo aneurismático (1 caso), metástasis de osteosarcoma (1 caso); encefalopatía crónica no evolutiva (1 caso); inflamatorias: artritis psoriásica (1 caso) (Tabla 2). Veinticinco de los 28 pacientes fueron operados por abor-

dajes posteriores únicos, uno fue intervenido por abordaje anterior, en dos, se emplearon abordajes combinados y 19 requirieron descompresión medular asociada a artrodesis.

Se realizaron 14 artrodesis occipito-cervicales, dos artrodesis atlanto-axoideas, cuatro artrodesis cervicales subaxiales, tres artrodesis cervico-torácicas y cinco occipito-torácicas. El promedio de niveles fusionados fue 4,4 (rango de 2 a 8), con una tasa de consolidación del 96%.

Nueve pacientes (32,14%) tuvieron complicaciones generales; aquellos con síndromes genéticos [6 casos (21,42%)] y con displasias esqueléticas [3 casos (10,71%)] fueron los que sufrieron más complicaciones (Tabla 3).

Tabla 2. Porcentaje de complicaciones en relación con la patología y la población global

Patologías	Cantidad de pacientes	% por patología	% global de complicaciones
Síndrome genético - En estudio: 1 - Klippel-Feil + VACTERL: 1 - Mucopolisacaridosis: 4 de tipo IV, 1 de tipo I - Neurofibromatosis 1: 2	15	40%	21,42%
Displasia esquelética - Condrodisplasia punctata: 3 - Displasia campomiélica: 1 - Acondroplasia: 1 - Displasia espondiloepifisaria: 1 - Disgenesia espinal: 2	7	42,85%	10,71%
Tumoral (quiste óseo aneurismático: 1, metástasis de osteosarcoma: 1)	2	0%	0 %
ECNE (cifoescoliosis: 1)	1	0%	0%
Trauma cervical (fractura por arma de fuego)	1	0%	0%
Inflamatorias (artritis psoriásica: 1)	1	0%	0%
Total	28		32,14%

ECNE = encefalopatía crónica no evolutiva.

Tabla 3. Complicaciones según el tiempo de presentación

Patología	Complicaciones inmediatas <1 mes	Complicaciones mediatas <6 meses	Complicaciones tardías >6 meses
<i>Síndromes genéticos: 5</i>			
En estudio (Klippel-Feil + VACTERL)			Compresión medular, canal estrecho por inestabilidad
Larsen	Fractura de masa lateral intraquirúrgica		
Apert	Aflojamiento postrauma		
Down	Infección		
Down	Fractura de masa lateral		
Mucopolisacaridosis: 1		Compresión medular por inestabilidad	
<i>Displasia esquelética: 3</i> Displasia campomiélica	Fractura de masa lateral		
Acondroplasia	Fractura de masa lateral		
Condrodisplasia punctata			Barra rota, pseudoartrosis

Trece pacientes tenían <6 años, siete de ellos sufrieron complicaciones (53,84%) y 15 niños tenían >6 años, y solo dos presentaron complicaciones (13,33%).

Seis pacientes requirieron reintervenciones: dos por inestabilidad adyacente, uno por cifoescoliosis distal, uno por aflojamiento postraumático (Figuras 1-7) y dos por compresión por recidiva tumoral. Estos dos pacientes no fueron incluidos en la estadística, porque no eran complicaciones directas de la técnica o del material, sino de la progresión del tumor. Se dividió a las complicaciones en dos grupos: menores (que no requirieron nuevas inter-

venciones), como infecciones y dehiscencias superficiales de la herida, y mayores (que requirieron nueva cirugía), como infecciones profundas, cifosis de unión distal y compresión medular.

Las complicaciones intraoperatorias fueron: cambios en el montaje por ruptura de masas laterales o pérdida de amarres: cuatro casos (2 pacientes <3 años), en dos, fue necesario modificar la técnica quirúrgica y, en los dos restantes, se colocaron ganchos sublaminares; pérdida de líquido cefalorraquídeo en la colocación de tornillos occipitales (4 casos).



▲ **Figura 1.** Radiografías preoperatorias anteroposteriores y laterales.



▲ **Figura 2.** Tomografía computarizada. Inestabilidad atlanto-axial.

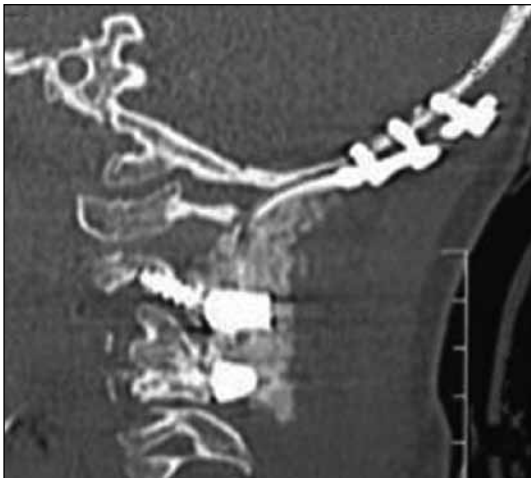
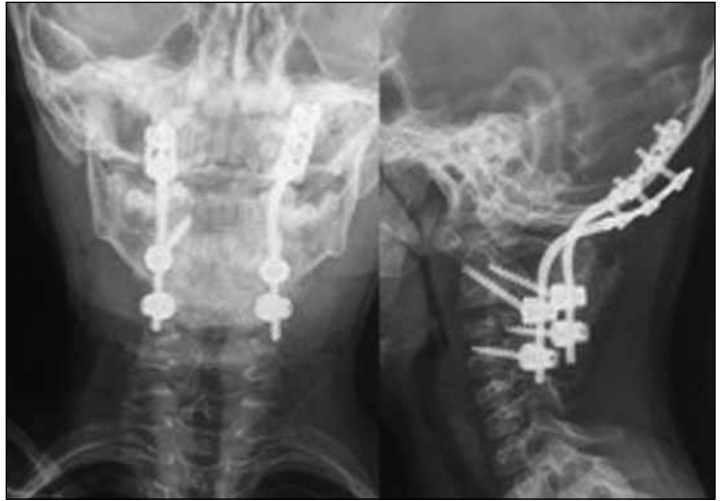


▲ **Figura 3.** Resonancia magnética. No hay evidencia de lesión medular.



◀ **Figura 4.** Tomografía computarizada con reconstrucción 2D. Se observa inestabilidad de C1-C2 e hipoplasia de odontoides.

Figura 5. Radiografía después de la caída. Se observa *full out* de tornillos occipitales. ▼



◀ **Figura 6.** Tomografía computarizada con reconstrucción 2D. *Full out* de tornillos occipitales.

Figura 7. Radiografías anteroposterior y lateral después de la revisión. ▶



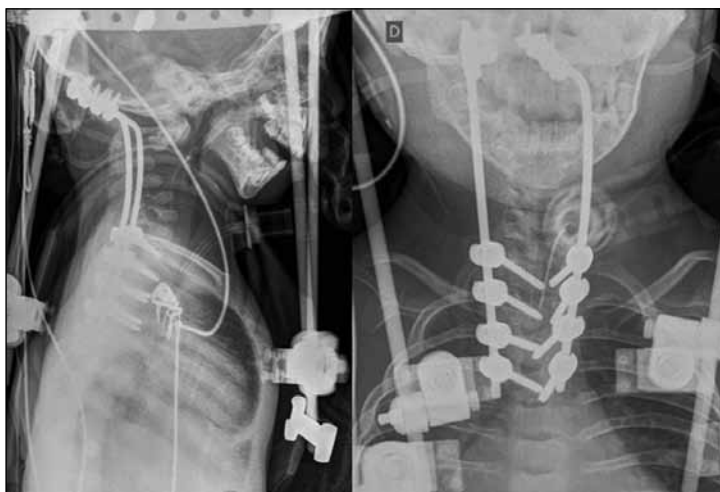
En tres pacientes, la instrumentación cervical fue dificultosa debido al grado de displasia de los elementos posteriores [displasia campomiélica (1 caso) y disgenesia espinal (2 casos)]; por ello, se realizó una fusión occipito-torácica en puente, todos tenían <2 años de edad (Figuras 8-12). Un paciente tuvo una infección de la herida quirúrgica que

requirió limpieza y antibiótico por vías endovenosa y oral. Las complicaciones posoperatorias inmediatas fueron: desanclaje de los tornillos occipitales con aflojamiento de halo cefálico por traumatismo a los 32 días de la cirugía y posterior pseudoartrosis, que requirió nueva cirugía a los seis meses.



▲ **Figura 8. A.** Radiografías cervicales anteroposterior y lateral. **B.** Resonancia magnética. Compresión medular grave y mielomalacia asociada.

Figura 9. Imágenes intraoperatorias. Descompresión posterior más fusión posterior instrumentada occipito-torácica. ▶



◀ **Figura 10.** Imágenes del posoperatorio inmediato. Fusión occipito-torácica más halo chaleco.



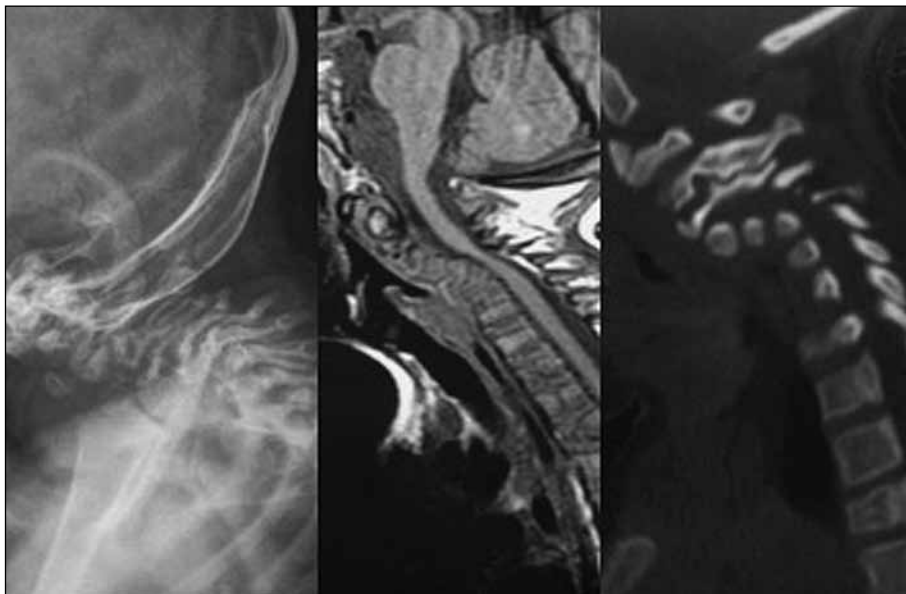
▲ **Figura 11.** Radiografía a los dos años de la cirugía.



▲ **Figura 12.** Tomografía computarizada con reconstrucción 3D a los dos años de la cirugía.

Las complicaciones posoperatorias alejadas fueron: un caso con ruptura de barra asociada a pseudoartrosis al año y medio de la cirugía en una fijación occipito-torácica, de un paciente con condrodisplasia punctata (Figuras 13-15);

dos casos de compresión medular por inestabilidad adyacente y cifosis de unión distal, que requirieron una nueva intervención quirúrgica.



▲ **Figura 13.** Cifosis cervical asociada a compresión medular.



▲ **Figura 14.** A los cuatro meses de la intervención, se observa fusión posterior instrumentada occipito-torácica.



▲ **Figura 15.** A los 11 meses de la cirugía. Seudoartrosis occipito-C1, sin deterioro del estado neurológico.

Discusión

En la cirugía de la columna cervical, existen numerosas técnicas quirúrgicas y diferentes tipos de implantes para realizar artrodesis. Los tornillos pediculares solos o asociados a masas laterales son hoy el patrón de referencia para las artrodesis cervicales posteriores en adultos, pues proporcionan fijaciones más estables y seguras, y evitan inmovilizaciones externas prolongadas.⁴

Si bien se han publicado reportes con escaso número de pacientes en los cuales se utiliza instrumental cervical de adulto en la población pediátrica, la gran mayoría contempla patologías cervicales aisladas, en una población que supera los 10 años y no describen todas las variables analizadas en esta serie. Los resultados se muestran dispares y fundamentalmente hacen énfasis en el alto porcentaje de complicaciones asociadas (Tabla 4).⁸⁻¹¹

Tabla 4. Comparación de resultados con estudios previos

Estudio	Autor	Cantidad de pacientes	Edad (años)	Año	Patologías	Técnicas o material	% de complicaciones	Nuestro trabajo
1	Prakash	20	1.4- 18.1	2014	Displasias esqueléticas	Alambrado	35%	10%
2	Tauchi	11	4-13	2011	Inestabilidad atlanto-axial en cualquier patología	Alambrados Tornillos Ganchos	64%	32,14%
3	Ain	25	2-47 9 adultos	2006	Displasias esqueléticas	Alambrados Tornillos Ganchos	20%	10%
4	Doyle ²¹	15	3-53 6 adultos	1996	Síndromes (Down)	Alambrado	73%	50%

Comparación del porcentaje de complicaciones con relación a la misma demografía.

El objetivo de nuestra serie fue mostrar la viabilidad de la instrumentación en pacientes <10 años de edad, y también enumerar las complicaciones relacionadas con las técnicas de instrumentación.

La instrumentación pediátrica representa un desafío para el cirujano, debido al pobre stock óseo, la presencia de cartílago, la falta de cierre de los elementos posteriores, el hueso inmaduro, las variantes anatómicas, las displasias, las anomalías congénitas y, sobre todo, el tamaño de las estructuras en relación con los implantes. Sin embargo, la tasa de fusión fue alta (96%) comparada con la comunicada por Tauchi y cols.¹⁰ (82%) y por Scott y cols.¹¹ (53%) con técnicas de alambrado y fusión simple.

Esta serie de 28 niños <10 años con instrumentación de la columna cervical representa, según nuestro conocimiento, la serie más grande publicada hasta la fecha.

Trece niños tenían <6 años, y siete de ellos (53,84%) tuvieron complicaciones; 15 niños tenían >6 años y solo dos (13,33%) presentaron complicaciones, lo cual significaría un aumento de las complicaciones inversamente proporcional a la edad.

El instrumental disponible en la actualidad: tornillos de 3,5 y 4 mm de diámetro, ganchos supralaminares o sublaminares, representó, en algunos casos, limitaciones, debido al tamaño o al grado de displasia de los elementos posteriores, sobre todo, en niños <6 años. Lo mismo ocurrió con los tornillos occipitales de 3,5 mm de diámetro y 6-8 mm de longitud, que fueron demasiado largos en todos los pacientes con invasión intracraneal, esto se asoció con la pérdida de líquido cefalorraquídeo en cuatro casos, pero ninguno tuvo complicaciones neurológicas o fístula; sin embargo, la toma bicortical representa un buen anclaje para la fijación. Por lo tanto, lo consideramos un método seguro de fijación sin mayores complicaciones asociadas.

Cuando el grado de displasia de los elementos posteriores, la fragilidad y el tamaño óseo hacen imposible la instrumentación limitada, recomendamos la fusión en puente

occipito-torácica, asociada o no a un abordaje anterior con injerto óseo estructural. En esta serie, realizamos cinco fusiones largas, con muy buenos resultados en términos de estabilización inmediata, corrección de la deformidad y fusión.

La planificación preoperatoria con medición tomográfica de masas laterales, pedículos, espesor de la calota craneal,¹²⁻¹⁴ es fundamental, a fin de minimizar las complicaciones y planificar la construcción por implantar.¹⁹

Leonard y Heuer sugieren que una buena instrumentación con tornillos C1-C2 no requiere de inmovilización externa.^{2,20} Creemos que es necesaria una protección posoperatoria de la artrodesis durante un período de 6 semanas a 3 meses, debido a que la longitud de los tornillos y el stock óseo nunca son lo suficientemente estables como para permitir la movilidad de entrada, además protege contra potenciales caídas, habituales en los niños, o fallas de montaje.

En los pacientes evaluados con tomografía computarizada, encontramos una aceptable cobertura de los tornillos con contención ósea total dentro de las masas laterales y los pedículos.

No se produjeron complicaciones neurológicas ni vasculares relacionadas con los tornillos.

Conclusiones

La instrumentación de la columna cervical en pacientes <10 años demostró ser un procedimiento viable y seguro, nos permitió una adecuada fijación estable e inmediata, con una tasa alta de consolidación en una amplia variedad de patologías.

Las displasias vertebrales, las anomalías congénitas y los pacientes sindrómicos, sumados al factor edad (<6 años) son las principales variables asociadas a las complicaciones ocurridas.

Si bien la instrumentación implica posibles riesgos en pacientes muy pequeños, el adecuado estudio por imágenes y el planeamiento quirúrgico contribuyeron a evitar complicaciones intraoperatorias y nos brindaron seguridad clínica en las fusiones.

Una minuciosa planificación del lugar de colocación de tornillos, un adecuado conocimiento de las variaciones anatómicas preoperatorias y una adecuada exposición de la columna reducen al mínimo las fallas de instrumentación.

Bibliografía

1. Harms J, Melcher RP. Posterior C1-C2 fusion with polyaxial screw and rod fixation. *Spine* 2001;26:2467-2471.
2. Leonard J, Wright N. Pediatric atlantoaxial fixation with bilateral, crossing C-2 translaminar screws. Technical note. *J Neurosurg* 2006;104:59-63.
3. Taylor JA, Dirks PB, Kulkarni AV, Rutka JT, Drake JM. Incorporation of C-1 lateral mass screws in occipitocervical and atlantoaxial fusions for children 8 years of age or younger. Technical note. *J Neurosurg* 2007;107:178-183.
4. Schmidt R, Koller H, Wilke H, Brade J, Zenner J, Meier OM. The impact of cervical pedicle screws for primary stability in multilevel posterior cervical stabilizations. *Spine* 2010;35:E1167-E1171.
5. Dickman CA, Sonntag VK, Papadopoulos SM, Hadley MN. The interspinous method of posterior atlantoaxial arthrodesis. *J Neurosurg* 1991;74:190-198.
6. Gallie WE. Skeletal traction in the treatment of fractures and dislocations of the cervical spine. *Ann Surg* 1937;106:770-776.
7. Hedequist D, Hresko T, Proctor M. Modern cervical spine instrumentation in children. *Spine* 2008;33:379-383.
8. Prakash S, William GM, Sah SA, Mihir T, Colleen D, Laurens H, et al. Occipitocervical fusion in skeletal dysplasia. *Spine* 2014;39:E912-E918.
9. Ain MC, Chaichana KL, Schkrohowsky JG. Retrospective study of cervical arthrodesis in patients with various types of skeletal dysplasia. *Spine* 2006;31:E169-E174.
10. Tauchi R, Imagama S, Ito Z, Ando K, Hirano K, Muramoto A. Complications and outcomes of posterior fusion in children with atlantoaxial instability. *Eur Spine J* 2012;21:1346-1352.
11. Scott DJ, Laueran WC, Wood KB, Krause DR. Complications and long-term outcome of upper cervical spine arthrodesis in patients with Down syndrome. *Spine* 1996;21(10):1223-1231.
12. Rishimughesh KP, Ajoy PS, Rajasekaran S. Anatomical feasibility of pediatric cervical pedicle screw insertion by computed tomographic morphometric evaluation of 376 pediatric cervical pedicles. *Spine* 2011;36:1297-1304.
13. Ferri de Barros F, Little DG, Bridge C, Cummine J, Cree KA. Atlantoaxial and craniocervical arthrodesis in children. A tomographic study comparing suitability of C2 pedicles and C2 laminae for screw fixation. *Spine* 2010;35:291-293.
14. Abdullah KG, Steinmetz MP, Mroz TE. Morphometric and volumetric analysis of the lateral masses of the lower cervical spine. *Spine* 2009;34:1476-1479.
15. Jeanneret B, Magerl F. Primary posterior fusion C1/2 in odontoid fractures: indications, technique, and results of transarticular screw fixation. *J Spinal Disord* 1992;5:464-475.
16. Roy-Camille R, Saillant G, Laville C. Treatment of lower cervical spinal injuries—C3 to C7. *Spine* 1992;17(10 Suppl):S442-S446.
17. Heller JG, Carlson GD, Abitbol JJ. Anatomic comparison of the Roy-Camille and Magerl techniques for screw placement in the lower cervical spine. *Spine* 1991;16(10 Suppl):S552-S557.
18. Grob D, Crisco JJ, Panjabi MM. Biomechanical evaluation of four different posterior atlantoaxial fixation techniques. *Spine* 1992;17:480-490.
19. Brockmeyer DL, York JE, Apfelbaum RI. Anatomical suitability of C1-2 transarticular screw placement in pediatric patients. *J Neurosurg* 2000;92:7-11.
20. Heuer GG, Hardesty DA, Bhowmick DA, Bailey R, Magge SN, Storm PB. Treatment of pediatric atlantoaxial instability with traditional and modified Goel-Harms fusion constructs. *Eur Spine J* 2009;18:884-892.
21. Doyle JS, Laueran WC, Wood KB, Krause DR. Complications and long-term outcome of upper cervical spine arthrodesis in patients with Down syndrome. *Spine* 1996;21(10):1223-1231.