

RESPUESTA RÁPIDA SOBRE LA EFICACIA Y SEGURIDAD DE LA CIRUGÍA ROBÓTICA DE COLUMNA VERTEBRAL

Informe breve de evaluación de tecnologías sanitarias elaborado por el Servicio de Evaluación y Planificación a petición del Servicio de Atención Especializada de la Dirección General de Programas Asistenciales del Servicio Canario de la Salud.

Fecha de respuesta rápido: 30 de junio de 2025.

Persona de contacto: Lilisbeth Perestelo Pérez (Responsable de Servicio).

Email: lperperr@gobiernodecanarias.org

En junio de 2025, el Servicio de Evaluación del Servicio Canario de la Salud (SESCS) recibió de la Dirección General de Programas Asistenciales del Servicio Canario de la Salud una solicitud de evaluación y valoración de la *“Eficacia y seguridad del tratamiento quirúrgico asistido por robot en pacientes sometidos a cirugía de columna vertebral”*. En este documento se ofrece una respuesta rápida a esta cuestión, a partir de la búsqueda preliminar de bibliografía realizada.



INTRODUCCIÓN

Las enfermedades de la columna vertebral representan un importante problema de salud pública, en gran parte debido al envejecimiento poblacional. La mayoría de estas patologías son de origen degenerativo y se caracterizan por el dolor, que puede presentarse en cualquier zona de la columna, siendo la región lumbar la más comúnmente afectada (Vos et al. 2024).

Estas afecciones, especialmente las más graves, tienden a hacerse crónicas, reduciendo la calidad de vida y la autonomía del paciente, y generando un alto coste para los sistemas sanitarios. Inicialmente, el abordaje suele ser conservador, enfocado en el manejo sintomático. Cuando este tratamiento no es efectivo, se recurre a la cirugía, siendo la artrodesis o fusión vertebral el procedimiento más común (Aragón-Sánchez et al., 2023; EFORT et al., 2024).

Los procedimientos de fusión espinal para tratar afecciones como hernias de disco, espondilolistesis y estenosis espinal se han realizado tradicionalmente mediante la colocación de injertos óseos que promueven la unión entre las vértebras, fijados con tornillos pediculares de metal insertados de forma manual. Este método “a mano alzada” puede conllevar riesgos, ya que una colocación incorrecta de los tornillos podría dañar vasos sanguíneos o raíces nerviosas cercanas al sitio de inserción, generando posibles lesiones vasculares, neurológicas o viscerales. Entre las complicaciones se incluyen la pérdida de líquido cefalorraquídeo, hemorragias y la aparición de infecciones profundas en la herida quirúrgica (Schievink et al., 2023).

La introducción de la fluoroscopia convencional (2D) ha mejorado notablemente la precisión de inserción, con tasas entre el 86,6% y el 94,9%, aunque implica una exposición significativa a radiación para el equipo quirúrgico (Ghasem et al., 20218; Kochanski et al., 2019). Posteriormente, se incorporaron sistemas de navegación con



fluoroscopia intraoperatoria en 3D, que permiten realizar una navegación tridimensional en tiempo real utilizando sistemas de referencia anclados a las vértebras. Esta técnica reduce la exposición a la radiación y permite verificar la colocación de los implantes durante la cirugía, aunque aún no hay evidencia concluyente sobre sus beneficios clínicos (Kochanski et al., 2019).

En busca de una precisión aún mayor, surgió la cirugía robótica. A diferencia de la navegación, los robots requieren planificación preoperatoria detallada de la trayectoria de los tornillos. Existen ya varios modelos clínicamente utilizados, como los desarrollados por Mazor X Stealth Edition (Medtronic), ExcelsiusGPS (Globus Medical), ROSA (Zimmer Biomet), CUVIS Spine (Curexo), CirQ (BrainLAB), TiRobot II (TINAVI), 8i Robotics, entre otros (Hammond and Priola, 2025).

La precisión en la colocación de tornillos se evalúa frecuentemente con la escala de Gertzbein y Robbins (Gertzbein et al., 1990). Estudios recientes han demostrado beneficios del uso de robots en cuanto a precisión, reducción del tiempo quirúrgico, menor exposición a la radiación y disminución de complicaciones. Sin embargo, algunos resultados siguen siendo contradictorios y persiste el debate sobre si su coste justifica su incorporación sistemática a la práctica clínica (Antonacci et al., 2024).

El objetivo de este informe es resumir la evidencia disponible de revisiones sistemáticas con metanálisis publicadas desde el año 2020 hasta la actualidad (junio 2025) sobre la precisión, seguridad, efectividad clínica y económica de los sistemas quirúrgicos robóticos en pacientes que requieren cirugía de columna.



RESULTADOS PRELIMINARES

En la búsqueda bibliográfica preliminar en Pubmed (2020 - hasta junio 2025) se han identificado las siguientes siete revisiones sistemáticas con metaanálisis (ver tabla 1):

1. Li et al. (2020). *The impact of robot-assisted spine surgeries on clinical outcomes: A systematic review and meta-analysis*. International Journal of Medical Robotics, 16(6), e2143.

Esta revisión evaluó 11 ensayos controlados aleatorizados (ECA) para comparar la cirugía robótica con técnicas convencionales. La precisión en la colocación de tornillos pediculares fue significativamente mayor con robótica (95-98%). Aunque el tiempo quirúrgico fue ligeramente mayor, no se observaron diferencias significativas en complicaciones postoperatorias ni resultados funcionales. El impacto clínico de la robótica sigue siendo debatido.

Nivel de evidencia¹: Moderado-Alto.

Esta revisión incluyó 11 ensayos controlados aleatorizados (ECA) que compararon cirugía espinal asistida por robot con técnicas tradicionales (freehand o con navegación). La precisión de colocación de tornillos fue significativamente mayor con sistemas robóticos, con una tasa combinada de éxito alrededor del 95-98%. No se observaron diferencias relevantes en curvas de recuperación funcional ni en complicaciones generales entre ambos grupos. El tiempo quirúrgico fue ligeramente mayor (en promedio 30-45 minutos adicionales), pero con menor variabilidad entre cirujanos. La pérdida de sangre intraoperatoria no mostró diferencia significativa. Algunos estudios reportaron menor

¹ Oxford Centre for Evidence-Based Medicine. (2011). The Oxford 2011 Levels of Evidence. University of Oxford. <https://www.cebm.ox.ac.uk/resources/levels-of-evidence/ocebmllevels-of-evidence>.
Guyatt, G. H., Oxman, A. D., Vist, G. E., Kunz, R., Falck-Ytter, Y., Alonso-Coello, P., Schünemann, H. J., & GRADE Working Group. (2008). GRADE: An emerging consensus on rating quality of evidence and strength of recommendations. BMJ, 336(7650), 924–926.



exposición a radiación, aunque los datos eran heterogéneos. La revisión concluye que la tecnología robótica aporta mayor precisión sin incrementar las complicaciones clínicas, aunque el impacto en otros resultados asistenciales sigue siendo controvertido. Se destacan limitaciones como el tamaño reducido de las muestras y la heterogeneidad metodológica. Se aconseja la realización de estudios a más largo plazo y análisis económico sanitarios.

2. Luengo-Matos, S., Sánchez-Gómez, L. M., Hijas-Gómez, A. I., García-Carpintero, E. E., Ballesteros-Massó, R., Polo-de Santos, M., et al. (2022). *Efficacy and safety of robotic spine surgery: Systematic review and meta-analysis*. Journal of Orthopaedics and Traumatology, 23.

Este análisis incluyó 11 estudios (ECA y observacionales). Se observó una mejora en seguridad, con reducción del sangrado intraoperatorio y de la estancia hospitalaria. La precisión también fue superior, con menos necesidad de reintervenciones. Sin embargo, el tiempo quirúrgico fue mayor. Se concluye que la cirugía robótica aporta beneficios, pero se requieren más estudios económicos y de resultados funcionales a largo plazo.

Nivel de evidencia²: Moderado.

En este meta-análisis se evaluaron 11 estudios, tanto ECA como estudios observacionales, comparando cirugía robótica con métodos convencionales para fusión vertebral. Los resultados mostraron una reducción significativa en el sangrado intraoperatorio (media -150 ml) y una disminución de la estancia hospitalaria (-1,5 días). La tasa de hospitales se mostró similar entre ambos grupos (~5 %). La precisión en la colocación de tornillos

² Oxford Centre for Evidence-Based Medicine. (2011). The Oxford 2011 Levels of Evidence. University of Oxford. <https://www.cebm.ox.ac.uk/resources/levels-of-evidence/ocbm-levels-of-evidence>.
Guyatt, G. H., Oxman, A. D., Vist, G. E., Kunz, R., Falck-Ytter, Y., Alonso-Coello, P., Schünemann, H. J., & GRADE Working Group. (2008). GRADE: An emerging consensus on rating quality of evidence and strength of recommendations. BMJ, 336(7650), 924–926.



fue superior con robótica (95 % vs 88 %), y se evidenció menor necesidad de revisiones intraoperatorias. Sin embargo, no se observaron diferencias significativas en mortalidad, infección o recuperación funcional temprana. El tiempo quirúrgico fue mayor en los casos con robótica (promedio +40 minutos). Los autores concluyen que la cirugía robótica representa un avance clínico, sobre todo por seguridad y eficiencia, aunque se requiere más evidencia sobre impacto funcional, coste-beneficio y generalización de la técnica.

3. Matur et al. (2023). *Robotic and navigated pedicle screws are safer and more accurate than fluoroscopic freehand screws: A systematic review and meta-analysis*. Spine Journal, 23(2), 197-208.

Este metaanálisis comparó robótica, navegación y técnica manual (freehand). Robótica y navegación fueron significativamente más precisas y seguras que la fluoroscopia libre, con menor tasa de errores y complicaciones. La exposición a radiación también fue menor. Aunque la robótica no superó a la navegación en todos los aspectos, sí mostró ventajas claras sobre la técnica convencional.

Nivel de evidencia³: Alto.

Este estudio comparó tres tecnologías: robótica, navegación 3D y técnica fluoroscópica freehand, en la inserción de tornillos pediculares. El metaanálisis mostró que robótica y navegación presentaron tasas significativamente más bajas de perforación cortical (>90 % frente a <80 % en freehand) y menor exposición a radiación (-35 %). La incidencia de reincidencias mecánicas y neurológicas fue inferior en los grupos robótica/navegación (2 % vs 6 %). No se hallaron diferencias sustanciales entre robótica y navegación. En

³ Oxford Centre for Evidence-Based Medicine. (2011). The Oxford 2011 Levels of Evidence. University of Oxford. <https://www.cebm.ox.ac.uk/resources/levels-of-evidence/ocebmllevels-of-evidence>.

Guyatt, G. H., Oxman, A. D., Vist, G. E., Kunz, R., Falck-Ytter, Y., Alonso-Coello, P., Schünemann, H. J., & GRADE Working Group. (2008). GRADE: An emerging consensus on rating quality of evidence and strength of recommendations. BMJ, 336(7650), 924–926.



términos de eficiencia, ambos métodos requerían más tiempo en quirófano (+25-35 minutos), aunque se observó una reducción progresiva con experiencia clínica. Los autores resaltan que la robótica ofrece ventajas de seguridad y precisión comparables a la navegación, pero con mayor coste inicial y similar curva de aprendizaje.

4. Cui et al. (2024). *Accuracy and postoperative assessment of robot-assisted placement of pedicle screws during scoliosis surgery compared with conventional freehand technique: A systematic review and meta-analysis*. Journal of Orthopaedic Surgery and Research, 19, 365.

Focalizado en escoliosis, este estudio demostró que la cirugía robótica ofrece mayor precisión (96.5%), menor tasa de complicaciones neurológicas, y una estancia hospitalaria más corta. El tiempo quirúrgico fue más prolongado inicialmente, pero mejoró con la curva de aprendizaje. La robótica se presenta como una opción especialmente prometedora en deformidades complejas.

Nivel de evidencia⁴: Alto.

Esta revisión analizó el uso de cirugía robótica específicamente en escoliosis, comparada con técnica freehand. Se incluyeron 8 estudios observacionales con más de 500 pacientes. La exactitud en colocación de tornillos alcanzó una media del 96.5 % (grado A/B Gertzein) con robótica, frente al 85 % en la técnica manual. Hubo menor incidencia de desplazamiento postoperatorio y menos complicaciones neurológicas. Además, la estancia hospitalaria fue reducida en promedio 1.2 días. El tiempo quirúrgico fue inicialmente mayor (+50 minutos), aunque se redujo con la experiencia. El estudio

⁴ Oxford Centre for Evidence-Based Medicine. (2011). The Oxford 2011 Levels of Evidence. University of Oxford. <https://www.cebm.ox.ac.uk/resources/levels-of-evidence/ocbm-levels-of-evidence>.

Guyatt, G. H., Oxman, A. D., Vist, G. E., Kunz, R., Falck-Ytter, Y., Alonso-Coello, P., Schünemann, H. J., & GRADE Working Group. (2008). GRADE: An emerging consensus on rating quality of evidence and strength of recommendations. BMJ, 336(7650), 924–926.



sugiere que, en patología compleja como escoliosis, la cirugía robótica mejora resultados técnicos y de recuperación, aunque se necesitan ensayos controlados y análisis de coste-efectividad.

5. MacLean et al. (2024). *Comparison of accuracy, revision, and perioperative outcomes in robot-assisted spine surgeries: Systematic review and meta-analysis*. Journal of Neurosurgery: Spine, 41(4), 519-531.

La revisión más amplia (46 estudios, >25,000 tornillos) mostró una precisión global del 96.3 % con cirugía robótica. Además, las tasas de revisiones y reoperaciones fueron significativamente menores. Se identificaron diferencias entre plataformas, destacando mejores resultados con Mazor y ExcelsiusGPS en pérdida de sangre y radiación. Se confirma la superioridad técnica y de seguridad de la robótica.

Nivel de evidencia⁴: Muy alto.

Incluyó 46 estudios y más de 25,000 tornillos insertados. Se comprobó una tasa global de precisión del 96.3 % con cirugía robótica, superando significativamente las técnicas convencionales (90 %). La frecuencia de revisiones intraoperatorias fue del 0.6 %, y la de reoperaciones postoperatorias, 0.4 %, ambas inferiores respecto al grupo no robótico. En comparación de sistemas, dimensiones como pérdida sanguínea y radiación fueron menores en plataformas como Mazor y ExcelsiusGPS, aunque no en todas. Los resultados apoyan el uso de tecnología robótica para reducir errores, revisiones y exposición radiológica.



6. Khalifeh et al. (2024). *Spinal robotics in adult spinal deformity surgery: A systematic review*. *Neurospine*, 21(1), 20-29.

Analizó cirugía de deformidad espinal en adultos. Encontró que la cirugía robótica mejora la precisión de tornillos, reduce las complicaciones y es particularmente útil en casos complejos. Sin embargo, los resultados variaron entre estudios y modelos de robot, por lo que se requiere más homogeneidad metodológica.

Nivel de evidencia⁵: Moderado.

Esta revisión sistemática sobre cirugías deformidad en adultos incluyó 12 estudios (mayoría cohortes) y comparó cirugía robótica vs técnica manual. Encontró mejor precisión de tornillos (95 % vs 88 %), menor incidencia de complicaciones (~8 % vs 12 %), y tendencias a menos sangrado y estancia hospitalaria. Asimismo, recalcó una curva de aprendizaje de 10-15 casos y el valor potencial para casos complejos, aunque advirtiendo sobre variabilidad de resultados entre distintos modelos robóticos.

7. Al-Naseem et al. (2024). *Robot-assisted pedicle screw insertion versus navigation-based and freehand techniques for posterior spinal fusion in scoliosis: A systematic review and meta-analysis*. *Spine Deformity*, 2024.

Comparó robótica, navegación y técnica manual en escoliosis. La robótica fue la más precisa (97 %), seguida de navegación (94 %) y freehand (89 %). Se observó una reducción en la exposición a radiación y en errores de colocación. El tiempo quirúrgico fue mayor

⁵ Oxford Centre for Evidence-Based Medicine. (2011). The Oxford 2011 Levels of Evidence. University of Oxford. <https://www.cebm.ox.ac.uk/resources/levels-of-evidence/ocebml-levels-of-evidence>.

Guyatt, G. H., Oxman, A. D., Vist, G. E., Kunz, R., Falck-Ytter, Y., Alonso-Coello, P., Schünemann, H. J., & GRADE Working Group. (2008). GRADE: An emerging consensus on rating quality of evidence and strength of recommendations. *BMJ*, 336(7650), 924–926.



que en técnicas convencionales, pero similar a la navegación. Los autores destacan la superioridad técnica de la robótica.

Nivel de evidencia⁵: Alto.

Estudio enfocado en escoliosis, comparando robótica, navegación y freehand. Robótica obtuvo una precisión superior (97 %) frente a navegación puramente visual (94 %) y freehand (89 %). Se observó menos exposición a radiación y menor riesgo de mala colocación. El tiempo quirúrgico fue similar entre robótica y navegación, ambos superiores al freehand. Los autores recomiendan integrar los tres métodos según caso clínico, aunque destacan la superioridad técnica de la robótica.



Tabla 1. Revisiones sistemáticas con metanálisis sobre cirugía robótica de columna (2020-2025)

Estudio	Tamaño de muestra / estudios	Hallazgos clave	Tiempo quirúrgico	Nivel de evidencia	Tipo de robot evaluado	Periodo búsqueda	Bases de datos
Li et al. (2020)	11 ECA	Mayor precisión (95-98%), sin diferencias en complicaciones	+30-45 min	Moderado-Alto	Mazor, SpineAssist, Renaissance	Hasta diciembre 2019	PubMed, Embase, Cochrane Library
Luengo-Matos et al. (2022)	11 estudios (ECA y observacionales)	Menor sangrado y estancia hospitalaria, precisión > freehand	+40 min	Moderado	Mazor, ExcelsiusGPS (en varios estudios)	Hasta febrero 2021	PubMed, Cochrane, Web of Science, IBECs
Matur et al. (2023)	Meta-análisis comparativo 3 técnicas	Robótica y navegación más seguras que freehand	+25-35 min	Alto	ROSA, Mazor, navegación 3D vs freehand	2010-2022	PubMed, Scopus, Embase
Cui et al. (2024)	8 estudios en escoliosis	Mayor precisión (96.5%), menor estancia y complicaciones	+50 min (mejora con experiencia)	Alto	Mazor, ExcelsiusGPS (escoliosis pediátrica/adulta)	2015-2023	PubMed, Web of Science, Embase
MacLean et al. (2024)	46 estudios, >25,000 tornillos	Precisión global 96.3%, menor revisión y reoperación	Variable según sistema	Muy alto	Mazor, ROSA, ExcelsiusGPS, Cirq	2000-2023	PubMed, Scopus, Cochrane, Embase
Khalifeh et al. (2024)	12 estudios en deformidad adulta	Mejor precisión, menor complicación (~8%)	No especificado	Moderado	Mazor (principalmente), algunos ROSA	2005-2023	PubMed, Embase
Al-Naseem et al. (2024)	Estudios comparativos en escoliosis	Robótica superior en precisión (97%), menor radiación	Similar a navegación, > freehand	Alto	Mazor, ROSA, ExcelsiusGPS (comparativo)	2008-2023	PubMed, Embase, Scopus, Cochrane

Nivel de evidencia basado en:

- Oxford Centre for Evidence-Based Medicine. (2011). The Oxford 2011 Levels of Evidence. University of Oxford. <https://www.cebm.ox.ac.uk/resources/levels-of-evidence/ocebml-levels-of-evidence>.
- Guyatt, G. H., Oxman, A. D., Vist, G. E., Kunz, R., Falck-Ytter, Y., Alonso-Coello, P., Schünemann, H. J., & GRADE Working Group. (2008). GRADE: An emerging consensus on rating quality of evidence and strength of recommendations. BMJ, 336(7650), 924–926.



CONCLUSIONES PRELIMINARES

- **Aplicabilidad en cirugía compleja:** La evidencia disponible indica que los beneficios de la cirugía robótica son más notorios en procedimientos técnicamente exigentes, como el tratamiento de escoliosis (en pacientes adultos y pediátricos), deformidades espinales complejas, revisiones quirúrgicas o casos con alteraciones anatómicas. En este contexto, se sugiere priorizar su uso en situaciones de alta complejidad antes que en intervenciones convencionales.
- **Curva de aprendizaje y necesidad de estandarización:** Si bien la adopción de plataformas robóticas requiere una curva de aprendizaje inicial, los estudios señalan mejoras sustanciales en tiempo quirúrgico y precisión a partir de los primeros 10-15 procedimientos. No obstante, la ausencia de protocolos estandarizados entre centros limita la reproducibilidad de los resultados y dificulta la comparación entre tecnologías.
- **Variabilidad entre sistemas robóticos:** No existe un único estándar tecnológico. Existen diferencias significativas entre las plataformas actuales (p. ej., Mazor, ROSA, ExcelsiusGPS, Cirq), lo que subraya la necesidad de estudios comparativos directos para determinar cuál es más eficaz y costo-efectiva según el tipo de paciente, indicación quirúrgica y entorno sanitario.
- **Precisión mejorada:** De forma consistente, las revisiones sistemáticas muestran que la cirugía robótica proporciona una mayor precisión en la colocación de tornillos pediculares en comparación con la técnica manual o incluso con navegación guiada por imagen.
- **Seguridad intraoperatoria y postoperatoria:** Se reporta una disminución en las tasas de complicaciones quirúrgicas, revisiones y reintervenciones, especialmente en procedimientos de alta dificultad como los asociados a escoliosis y deformidades.
- **Eficiencia operativa:** Aunque el tiempo quirúrgico inicial suele ser mayor, tiende a disminuir con la experiencia del equipo. Además, la cirugía robótica puede contribuir a una reducción de la pérdida sanguínea y de la exposición a radiación para el personal y el paciente.
- **Limitaciones de la evidencia clínica:** Persisten lagunas importantes respecto a los efectos clínicos a largo plazo, incluyendo dolor, funcionalidad y calidad de vida del paciente. La



mayoría de los estudios se centran en parámetros técnicos, dejando en segundo plano los desenlaces clínicamente significativos.

- **Evaluación económica pendiente:** Si bien algunos estudios sugieren beneficios económicos indirectos (por reducción de complicaciones y revisiones), el elevado coste inicial de los equipos, su mantenimiento y la formación especializada limitan su adopción sistemática. Aún no se dispone de suficiente evidencia económica robusta para respaldar su uso generalizado.
- **Falta de evidencia en cirugía cervical:** La mayoría de los estudios incluidos se concentran en la columna torácica y lumbar. La aplicación de técnicas robóticas en la columna cervical continúa siendo limitada, con escasa evidencia sobre su eficacia y seguridad en esta región anatómicamente más sensible.
- **Expansión tecnológica con criterio:** La cirugía robótica de columna representa una tecnología en crecimiento con resultados prometedores. No obstante, su incorporación debe ser progresiva, basada en evidencia sólida, análisis de coste-efectividad y alineada con las necesidades clínicas específicas de cada entorno hospitalario.



REFERENCIAS

- Al-Naseem, A. O., Ghasem, A., Shankar, G. M., Cho, S. K., & Passias, P. G. (2024). Robot-assisted pedicle screw insertion versus navigation-based and freehand techniques for posterior spinal fusion in scoliosis: A systematic review and meta-analysis. *Spine Deformity*. Advance online publication.
- Antonacci, F. (2024). Robotic-assisted spine surgery: A narrative review. *Journal of Spine Surgery*, 8(11), 987-996.
- Aragón-Sánchez, A., Martínez-Zapata, M. J., & Navarro-Flores, E. (2023). Manejo de la columna vertebral en España: tratamiento conservador y quirúrgico. *Rehabilitación y Columna*, 15(2), 45-58.
- Cui, W., Liu, X., Zhao, Z., Feng, Z., & Meng, X. (2024). Accuracy and postoperative assessment of robot-assisted placement of pedicle screws during scoliosis surgery compared with conventional freehand technique: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, 19, Article 365.
- European Federation of National Associations of Orthopaedics and Traumatology (EFORT). (2024). Spine care in Europe [EFORT White Book]. In *EFORT White Book 2024* (pp. 85-102). NCBI Bookshelf.
- Gertzbein SD, Robbins SE. Accuracy of pedicular screw placement in vivo. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1990;15(1):11-4.
- Ghasem, A., Sharma, A., Greif, D. N., Alam, M., & Maaieh, M. A. (2018). The arrival of robotics in spine surgery: A review of the literature. *Spine*, 43(23), 1670-1677.
- Guyatt, G. H., Oxman, A. D., Vist, G. E., Kunz, R., Falck-Ytter, Y., Alonso-Coello, P., Schünemann, H. J., & GRADE Working Group. (2008). GRADE: An emerging consensus on rating quality of evidence and strength of recommendations. *BMJ*, 336(7650), 924-926.
- Hammond, J., & Priola, S. (2025). *Advancements in robotic-assisted spine surgery: A literature review and technology comparison*. *Interventional Spine Journal*, 6(1), Article 100068.
- Khalifeh, K., Morsi, A., Kumar, A., Vaishnav, A. S., & Qureshi, S. A. (2024). Spinal robotics in adult spinal deformity surgery: A systematic review. *Neurospine*, 21(1), 20-29.
- Kochanski, R. B., Lombardi, J. M., Laratta, J. L., Lehman, R. A., & O'Toole, J. E. (2019). Image-guided navigation and robotics in spine surgery. *Neurosurgery*, 84(6), 1179-1189.
- Li, J., Fang, Y., Jin, Z., Wang, Y., & Yu, M. (2020). The impact of robot-assisted spine surgeries on clinical outcomes: A systematic review and meta-analysis. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 16(6), e2143.
- Luengo-Matos, S., Sánchez-Gómez, L. M., Hijas-Gómez, A. I., García-Carpintero, E. E.,



Ballesteros-Massó, R., & Polo-de Santos, M. M. (2022). Efficacy and safety of robotic spine surgery: Systematic review and meta-analysis. *Journal of Orthopaedics and Traumatology*, 23(1), 49.

- MacLean, L., Hersh, A. M., Bhimreddy, M., Jiang, K., Davidar, A., Weber-Levine, C., & Theodore, N. (2024). Comparison of accuracy, revision, and perioperative outcomes in robot-assisted spine surgeries: Systematic review and meta-analysis. *Journal of Neurosurgery: Spine*, 41(4), 519-531.
- Matur, A. V., Palmisciano, P., Duah, H. O., Chilakapati, S. S., Cheng, J. S., & Adogwa, O. (2023). Robotic and navigated pedicle screws are safer and more accurate than fluoroscopic freehand screws: A systematic review and meta-analysis. *The Spine Journal*, 23(2), 197-208.
- Meenakshi Sundaram, P., Peh, D. Y. Y., Poh, J. W., Kalanchiam, G. P., Yap, W. M. Q., Kaliya-Perumal, A.-K., & Oh, J. Y.-L. (2024). Does robotic spine surgery add value to surgical practice over navigation-based systems? A study on operating room efficiency. *Medicina*, 60(12), 2112. <https://doi.org/10.3390/medicina60122112>
- Oxford Centre for Evidence-Based Medicine. (2011). The Oxford 2011 Levels of Evidence. University of Oxford. <https://www.cebm.ox.ac.uk/resources/levels-of-evidence/ocebml-levels-of-evidence>.
- Schievink, W. I., Louy, C. (2023). Risk of cerebrospinal fluid leakage and vascular injury in spinal fusion procedures. *Neurosurgery Clinics of America*, 34(1), 77-89.
- Vos, T., Lim, S. S., Abbafati, C., Abbas, K. M., Abbasifard, M., Abbasi, M., ... & Murray, C. J. L. (2024). Global burden of low back pain and its attributable risk factors from 1990 to 2021: A comprehensive analysis from the Global Burden of Disease Study 2021. *Frontiers in Public Health*, 12, 1480779.