

DOI: 10.26820/recimundo/9.(3).sep.2025.31-41

URL: <https://recimundo.com/index.php/es/article/view/2743>

EDITORIAL: Saberes del Conocimiento

REVISTA: RECIMUNDO

ISSN: 2588-073X

TIPO DE INVESTIGACIÓN: Artículo de revisión

CÓDIGO UNESCO: 32 Ciencias Médicas

PAGINAS: 31-41



Técnicas innovadoras en cirugía del esqueleto axial

Innovative techniques in skeletal surgery

Técnicas inovadoras em cirurgia esquelética

María Daniela Zambrano Figueroa¹; Camila Mishelle Luna Jiménez²; Cristhina Alejandra De La Torre León³; Paola Catalina Romero López⁴

RECIBIDO: 02/07/2025 **ACEPTADO:** 15/08/2024 **PUBLICADO:** 09/10/2025

1. Médica Cirujana; Médica Residente en la Clínica Toa; Quito, Ecuador; dannazf18@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0007-1333-2708>
2. Médica General; Investigadora Independiente; Quito, Ecuador; camilalunajimenez@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0001-3368-0650>
3. Magíster en Seguridad y Salud Ocupacional; Médica Cirujana; Médico Residente en Medicina Interna; Hospital de Especialidades de las Fuerzas Armadas No. 1; Quito, Ecuador; cris.delatorre1940@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0004-9397-7490>
4. Médica General; Médica Residente en Unidad de Cuidados Intensivos; Hospital de Especialidades de las Fuerzas Armadas No. 1; Quito, Ecuador catagrillo94@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0006-4835-5275>

CORRESPONDENCIA

María Daniela Zambrano Figueroa

dannazf18@gmail.com

Quito, Ecuador

RESUMEN

Este informe presenta una revisión exhaustiva de las innovaciones quirúrgicas más disruptivas en el esqueleto axial (columna vertebral, unión cráneo-cervical y base del cráneo) publicadas entre 2015 y 2025. El objetivo fue analizar la eficacia y seguridad de las técnicas mínimamente invasivas (MIS), la robótica de precisión, la navegación intraoperatoria y los biomateriales de impresión 3D, contrastando sus resultados con los procedimientos convencionales. Metodología: Se realizó una síntesis de la evidencia reciente, priorizando revisiones sistemáticas, metaanálisis y estudios clínicos que reportan métricas funcionales (Índice de Discapacidad de Oswestry - ODI, Escala Visual Analógica - VAS) y métricas quirúrgicas (Pérdida de Sangre Estimada - EBL, Duración de la Estancia Hospitalaria - LOS, precisión de implantes). Resultados Principales: Las innovaciones han desplazado el paradigma quirúrgico hacia la mínima invasión con precisión asistida. 1) La cirugía mínimamente invasiva (MIS), ejemplificada por la fusión intersomática lumbar transforaminal (MIS-TLIF), demostró resultados funcionales superiores a largo plazo, con una mejoría en el ODI a los 12 meses en comparación con la cirugía abierta. Sin embargo, se evidenció un aumento significativo en la exposición a la radiación intraoperatoria. 2) Las plataformas robóticas han validado su seguridad en la colocación de implantes, alcanzando tasas de precisión de tornillos pediculares consistentemente altas, variando entre el 95.5% y el 98.7% en cirugía de deformidad espinal. 3) La endoscopia avanzada ha permitido la emergencia de procedimientos complejos, como la Fusión y Descompresión Cervical Anterior Totalmente Endoscópica (eACDF), que ofrece una recuperación ultrarrápida (alta en menos de 24 horas) y minimiza la morbilidad de tejidos blandos, como la disfagia. 4) La impresión 3D ha optimizado los implantes de fusión mediante la creación de estructuras reticulares y porosas con acción capilar que promueven activamente la osteointegración, superando las limitaciones biológicas y biomecánicas de los dispositivos tradicionales. Conclusiones: La integración de la MIS con tecnologías de precisión (robótica, navegación) y la bioingeniería de implantes 3D son los pilares de la cirugía axial moderna. Este enfoque combinado está redefiniendo los estándares de seguridad y eficacia, enfocándose en la reducción de la iatrogenia y la aceleración de la recuperación funcional del paciente.

Palabras clave: Columna vertebral, Base del cráneo, Cráneo, Cervical.

ABSTRACT

This report presents an exhaustive review of the most disruptive surgical innovations in the axial skeleton (spine, cranio-cervical junction, and skull base) published between 2015 and 2025. The objective was to analyze the efficacy and safety of minimally invasive techniques (MIS), precision robotics, intraoperative navigation, and 3D-printed biomaterials, contrasting their outcomes with conventional procedures. Methodology: A synthesis of recent evidence was performed, prioritizing systematic reviews, meta-analyses, and clinical studies reporting functional metrics (Oswestry Disability Index - ODI, Visual Analogue Scale - VAS) and surgical metrics (Estimated Blood Loss - EBL, Length of Hospital Stay - LOS, implant accuracy). Key Findings: Innovations have shifted the surgical paradigm toward minimally invasive procedures with assisted precision. 1) Minimally Invasive Surgery (MIS), exemplified by the Transforaminal Lumbar Interbody Fusion (MIS-TLIF), demonstrated superior long-term functional outcomes, with improved ODI at 12 months compared to open surgery. However, a significant increase in intraoperative radiation exposure was noted. 2) Robotic platforms have validated their safety in implant placement, achieving consistently high pedicle screw accuracy rates, ranging between 95.5% and 98.7% in spinal deformity surgery. 3) Advanced endoscopy has enabled the emergence of complex procedures, such as the Endoscopic Total Anterior Cervical Decompression and Fusion (eACDF), which offers ultra-fast recovery (discharge in less than 24 hours) and minimizes soft tissue morbidity, such as dysphagia. 4) 3D printing has optimized fusion implants by creating porous, lattice structures with capillary action that actively promote osseointegration, overcoming the biological and biomechanical limitations of traditional devices. Conclusions: The integration of MIS with precision technologies (robotics, navigation) and 3D implant bioengineering are the cornerstones of modern axial surgery. This combined approach is redefining safety and efficacy standards, focusing on reducing iatrogenesis and accelerating patient functional recovery.

Keywords: Spine, Skull base, Skull, Cervical.

RESUMO

Este relatório apresenta uma revisão exaustiva das inovações cirúrgicas mais disruptivas no esqueleto axial (coluna vertebral, junção craniocervical e base do crânio) publicadas entre 2015 e 2025. O objetivo foi analisar a eficácia e a segurança das técnicas minimamente invasivas (MIS), robótica de precisão, navegação intraoperatória e biomateriais impressos em 3D, contrastando os seus resultados com os procedimentos convencionais. Metodologia: Foi realizada uma síntese das evidências recentes, priorizando revisões sistemáticas, meta-análises e estudos clínicos que relatam métricas funcionais (Índice de Incapacidade de Oswestry - ODI, Escala Visual Analógica - VAS) e métricas cirúrgicas (Perda Estimada de Sangue - EBL, Tempo de Internação Hospitalar - LOS, precisão do implante). Principais conclusões: As inovações mudaram o paradigma cirúrgico para procedimentos minimamente invasivos com precisão assistida. 1) A cirurgia minimamente invasiva (MIS), exemplificada pela fusão intercorporal lombar transforaminal (MIS-TLIF), demonstrou resultados funcionais superiores a longo prazo, com melhoria do ODI aos 12 meses em comparação com a cirurgia aberta. No entanto, observou-se um aumento significativo na exposição à radiação intraoperatória. 2) As plataformas robóticas validaram a sua segurança na colocação de implantes, alcançando taxas de precisão consistentemente elevadas dos parafusos pediculares, variando entre 95,5% e 98,7% na cirurgia de deformidade da coluna vertebral. 3) A endoscopia avançada permitiu o surgimento de procedimentos complexos, como a Descompressão e Fusão Cervical Anterior Total Endoscópica (eACDF), que oferece recuperação ultrarrápida (alta em menos de 24 horas) e minimiza a morbilidade dos tecidos moles, como a disfagia. 4) A impressão 3D otimizou os implantes de fusão, criando estruturas porosas em rede com ação capilar que promovem ativamente a osseointegração, superando as limitações biológicas e biomecânicas dos dispositivos tradicionais. Conclusões: A integração da CMI com tecnologias de precisão (robótica, navegação) e bioengenharia de implantes 3D são os pilares da cirurgia axial moderna. Esta abordagem combinada está a redefinir os padrões de segurança e eficácia, com foco na redução da iatrogenia e na aceleração da recuperação funcional do paciente.

Palavras-chave: Coluna vertebral, Base do crânio, Crânio, Cervical.

Introducción

El esqueleto axial, que incluye la columna vertebral y la base del cráneo, cumple la función vital de proteger el sistema nervioso central y proporcionar soporte estructural. Las afecciones que requieren intervención quirúrgica, tales como la enfermedad degenerativa del disco, la estenosis espinal, las deformidades complejas y las neoplasias, representan una morbilidad sustancial y una carga socioeconómica creciente (1). Históricamente, la cirugía axial, especialmente la espinal, ha requerido abordajes abiertos extensos para asegurar una exposición adecuada y permitir la instrumentación y descompresión necesarias. Este método, aunque efectivo, se asocia intrínsecamente con una morbilidad significativa derivada del daño muscular iatrogénico, la pérdida sanguínea considerable y los subsiguientes periodos de recuperación prolongados.

El principio ético fundamental de la práctica médica, “primum non nocere” (primero, no hacer daño), ha catalizado la transición hacia técnicas mínimamente invasivas (MIS) en la cirugía del esqueleto axial (2). El objetivo principal es minimizar la lesión iatrogénica inherente al acceso quirúrgico, lo que se traduce en menos dolor postoperatorio y una recuperación funcional acelerada (3).

No obstante, la complejidad anatómica del eje axial exige que esta reducción en la invasividad no comprometa la precisión y la seguridad. Por ello, las innovaciones más recientes (2020-2025) han convergido en tres dominios tecnológicos complementarios: la mejora de la visualización (mediante endoscopia avanzada y realidad aumentada), la automatización de la guía (a través de la robótica y la navegación intraoperatoria) y la optimización de la interfaz biológica (mediante la bioingeniería y la impresión 3D de implantes) (4). El foco se ha desplazado de simplemente reparar a reparar con la máxima precisión y la mínima alteración tisular.

La robótica médica es una tecnología en desarrollo que está revolucionando la prác-

tica quirúrgica desde hace algunos años, con robots asistentes que proveen al cirujano de una precisa herramienta de apoyo en sus tareas cotidianas. Las ventajas para el paciente son múltiples como cicatrices más pequeñas, menor pérdida de sangre, tiempos de recuperación más cortos, entre otras. Pero lo más importante es la disminución en los errores que pueden ser atribuibles al personal médico (5).

Metodología

La presente investigación se fundamenta en una revisión exhaustiva de la literatura científica biomédica. La búsqueda se centró en bases de datos clave como PubMed y PMC, utilizando términos estructurados en español e inglés relacionados con la columna vertebral (Spine, Columna), la base del cráneo (Skull Base, Base de Cráneo) y la unión cráneo-cervical, combinados con términos de innovación (Robotics, 3D Printing, MIS, Endoscopy, Navigation).

Se aplicaron criterios rigurosos para asegurar la actualidad y la solidez de la evidencia:

Criterios de Inclusión: Se incluyeron únicamente artículos publicados o indexados desde el 2015 hasta el presente (2025), garantizando la contemporaneidad de la información. Se priorizaron los estudios con un alto nivel de evidencia, como revisiones sistemáticas, metaanálisis y ensayos clínicos comparativos. El enfoque anatómico se restringió a procedimientos en la columna vertebral (cervical, torácica, lumbar), la unión cráneo-cervical y la base del cráneo.

Criterios de Exclusión: Se descartaron estudios preclínicos (in vitro o en modelos animales), literatura previa a 2020, y reportes de casos o series pequeñas sin un análisis comparativo robusto.

Resultados

Avances en Cirugía Mínimamente Invasiva (MIS) y Endoscopia

Las técnicas MIS y la endoscopia han solidificado su posición como métodos preferenciales para el tratamiento de patologías degenerativas (2), gracias a la minimización del traumatismo sobre la musculatura paravertebral y los ligamentos.

Eficacia de MIS en la Columna Lumbar: Comparación Funcional y Riesgos Ocupacionales

En la columna lumbar, la Descompresión Lumbar Mínimamente Invasiva (MILD®) ha demostrado ser un procedimiento eficaz para el tratamiento de la estenosis espinal, según una revisión sistemática y metaanálisis reciente (6).

Al comparar la Fusión Intersomática Lumbar Transforaminal Mínimamente Invasiva (MIS-TLIF) con su contraparte abierta, se observó que la MIS proporciona una mejoría clínica ligeramente superior a largo plazo. En un estudio comparativo, el ODI promedio a los 12 meses fue de 30.3 para el grupo MIS frente a 35.6 para el grupo abierto (7). Esta superioridad funcional se correlaciona con una recuperación postoperatoria acelerada. Por ejemplo, en los procedimientos endoscópicos de columna, se reporta que hasta el 63% de los pacientes retornan a sus actividades laborales en un periodo de tres meses (8).

No obstante, el análisis de las métricas de seguridad intraoperatoria reveló una preocupación significativa. La superioridad de la MIS en la recuperación del paciente se contrapone directamente a un aumento del riesgo ocupacional para el equipo quirúrgico. El estudio de Wong et al. (citado en) mostró que los procedimientos MIS-TLIF se asociaron con un aumento de 2.5 veces en la exposición a la radiación ionizante para el personal de quirófano, alcanzando frente a la cirugía abierta (7). Este hallazgo subraya la necesidad crítica de integrar sistemas de navegación y robótica para reducir la dependencia de la fluoroscopia continua durante el posicionamiento de los implantes.

Cirugía Endoscópica en la Columna Cervical y Unión Cráneo-Cervical

La endoscopia ha expandido su aplicación a la columna cervical, abordando patologías complejas como la estenosis de canal y la mielopatía cervical. El desarrollo de la Fusión y Descompresión Cervical Anterior Totalmente Endoscópica (eACDF) representa un avance clave en la unión cráneo-cervical (9).

Esta técnica novedosa, publicada en una prestigiosa revista internacional de cirugía de columna, utiliza instrumentación especializada para la descompresión completa del canal y la colocación percutánea de una jaula intersomática de perfil cero. El procedimiento ofrece una visualización excelente del canal espinal gracias a la irrigación continua, lo que facilita la eliminación segura de osteofitos y fragmentos discales (9).

Los resultados clínicos de la eACDF son notables, priorizando la recuperación ultrarrápida. Los pacientes logran la deambulación en tan solo 4 a 6 horas post-cirugía, y el alta hospitalaria se produce, generalmente, en menos de 24 horas. El abordaje ultra-mínimamente invasivo disminuye la presión sobre los tejidos blandos circundantes (tráquea y esófago), reduciendo significativamente el riesgo de disfagia y ronquera postoperatorias en comparación con la ACDF abierta tradicional (9).

Endoscopia en la Base del Cráneo

En la base del cráneo, los abordajes endoscópicos transnasales han demostrado su eficacia para patologías tumorales. Una revisión sistemática mostró que estos abordajes han conseguido tasas de resección completa de cordomas y craneofaringiomas iguales o superiores a los abordajes transcraneales clásicos. El beneficio primario es la minimización de las complicaciones postoperatorias sistémicas. Aunque el riesgo de fístula de líquido cefalorraquídeo (LCR) postoperatoria sigue siendo un desafío, la endoscopia también es eficaz para el tratamiento de fístulas de LCR, encefalocelos y meningocelos (10).

Plataformas de Robótica y Navegación de Alta Precisión



Figura 1. Arquitectura del robot modificado

Fuente: Muñoz & Vivas (5).

La necesidad de compensar las limitaciones de la visualización y la exposición a la radiación de la MIS ha llevado a la rápida integración de la robótica y la navegación intraoperatoria en la cirugía axial.

Robótica en la Fijación Pedicular y Deformidad Espinal

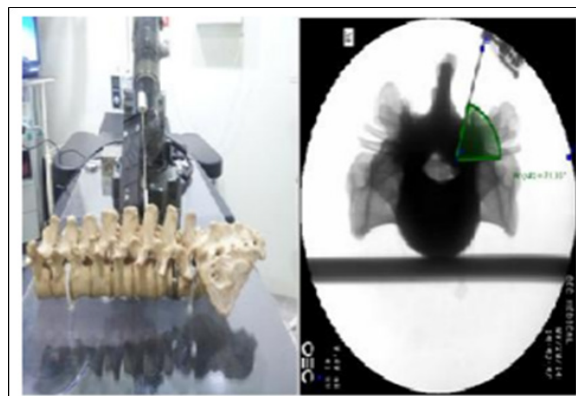


Figura 2. Validación del ángulo transversa

Fuente: Muñoz & Vivas (5).

Las plataformas robóticas (incluyendo sistemas como ExcelsiusGPS, Mazor X Stealth Edition, y ROSA) han evolucionado para asistir la colocación precisa de tornillos pediculares, que es crucial para el éxito de la fusión espinal. Estos sistemas permiten la automatización de tareas repetitivas y estandarizan la colocación de implantes a un nivel de precisión submilimétrico, minimizando el potencial error humano (10).

La evidencia clínica más reciente valida esta precisión. Una revisión sistemática sobre la robótica en la Cirugía de Deformidad Espinal del Adulto (ASD) analizó tornillos

insertados con asistencia robótica. La tasa de precisión clínicamente aceptable, según la Escala de Gertzbein-Robbins, se reportó consistentemente entre el 95.5% y el 98.7%. Esta alta precisión es fundamental para la seguridad, ya que reduce el riesgo de lesiones neurológicas o vasculares asociadas a la malposición de los tornillos. La robótica, por lo tanto, eleva el estándar de cuidado y permite a los cirujanos abordar deformidades complejas con mayor confianza y resultados predecibles (11).

Integración de Navegación y Realidad Aumentada (AR)

La navegación es una tecnología complementaria que utiliza imágenes en tiempo real y mapas virtuales para guiar los instrumentos quirúrgicos con precisión extrema. Su integración con la robótica permite procedimientos más automatizados y precisos, como la colocación de tornillos e implantes (13).

La próxima generación de guía intraoperatoria implica la Realidad Aumentada (AR). La AR superpone información digital crítica, como planos quirúrgicos o trayectorias de tornillos, directamente en el campo de visión del cirujano. Esta integración visual mejora la toma de decisiones al eliminar la necesidad de que el cirujano desvíe la vista

a un monitor, lo que potencialmente aumenta la seguridad y la eficiencia en procedimientos complejos (13).

Innovación en Biomateriales e Implanto-logía 3D

El éxito a largo plazo de la fusión vertebral depende de la capacidad del implante intersomático para promover una osteointegración y fusión robusta. La impresión 3D (Fabricación Aditiva) ha sido una tecnología disruptiva en la ingeniería de implantes espinales (14).

Implantes de Fusión con Estructuras Porosas de Titanio (Impresión 3D)

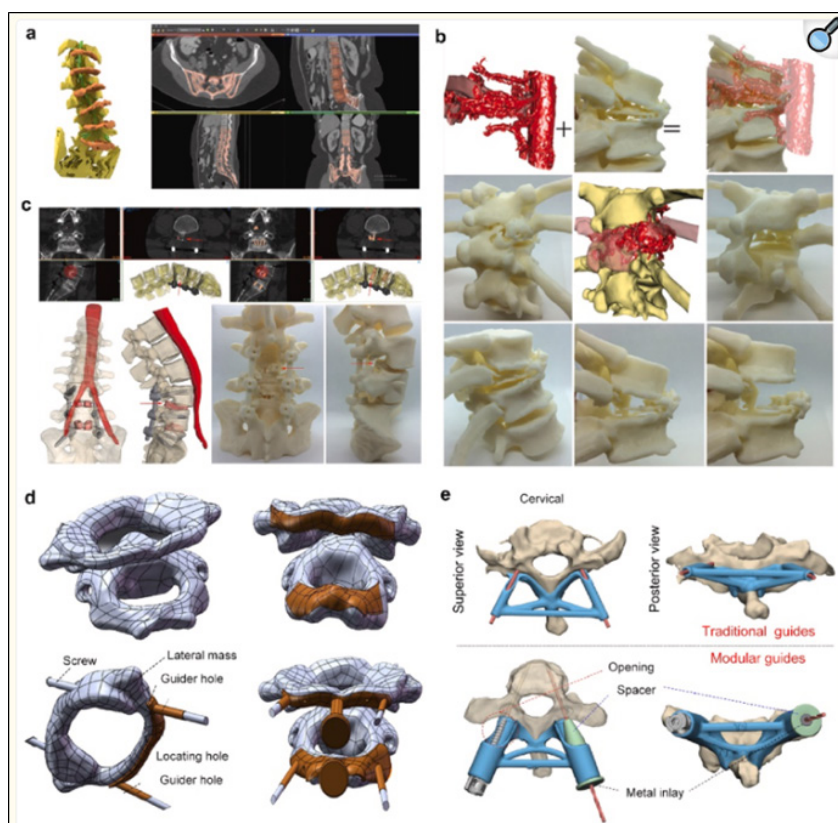


Figura 3. Ejemplos de modelos anatómicos impresos en 3D (a – c) y guías de tornillos (d – e) en cirugía de columna. (a). Captura de pantalla de la segmentación por TC de la columna lumbar por computadora (izquierda) y el modelo anatómico espinal impreso en 3D (derecha). (b – c). Ejemplos de modelos anatómicos impresos en 3D para planificación preoperatoria (b) que representan la distribución vascular compleja de tumores espinales o (c) cirugías de revisión complejas (L4-S1). (d). Diseño de la plantilla guía para la implantación de tornillos pediculares atlantoaxiales posteriores. (e). Dos tipos de guías de implantación de tornillos pediculares, incluyendo guías de perforación personalizadas tradicionales (arriba) y guías modulares innovadoras (abajo)

Fuente: Tian et al (15).

Los implantes espinales fabricados por impresión 3D, típicamente en titanio, están diseñados para superar las limitaciones biológicas de los implantes sólidos. La tecnología 3D permite la creación de una estructura reticular o rejilla con tamaños de poros definibles, diseñada específicamente para imitar la arquitectura del hueso esponjoso (4). Esta bioingeniería fomenta la osteointegración al permitir la entrada celular y el crecimiento de nuevo tejido óseo dentro del implante (16).

Los diseños avanzados también abordan desafíos biomecánicos, ajustando la estructura para adaptarse a las propiedades elásticas del hueso. Esto minimiza el fenómeno de stress shielding (la protección excesiva que impide la carga natural y, por ende, la formación ósea). Además de la optimización estructural, se han desarrollado características funcionales como la acción capilar. Esta propiedad permite que los implantes absorban activamente fluidos biológicos (como la sangre o el injerto óseo líquido), asegurando una interacción íntima y rápida entre el implante y la estructura ósea, lo que se considera un acelerador clave en el proceso de fusión (4).

Materiales de Última Generación

Más allá del titanio poroso, la innovación incluye el uso de nuevos materiales para implantes dentales y espinales, como el Zirconio y polímeros avanzados. Estos materiales ofrecen alta a máxima biocompatibilidad, con un riesgo alérgico nulo o muy bajo, y son esenciales para soluciones personalizadas en casos de anatomía compleja (17).

Estrategias Adyuvantes: Medicina Regenerativa

La medicina regenerativa se está integrando como complemento a los procedimientos quirúrgicos, con el objetivo de promover la reparación tisular y potencialmente retrasar la degeneración espinal (18).

- **Plasma Rico en Plaquetas (PRP):** Se emplea como una concentración autóloga de factores de crecimiento inyectada

en áreas lesionadas (discos intervertebrales, ligamentos o articulaciones facetarias) para estimular los procesos de curación natural (18).

- **Terapia con Células Madre Mesenquimales (CMM):** Las CMM, obtenidas de la médula ósea o tejido adiposo, se están investigando para la reparación de discos intervertebrales y el manejo de la degeneración facetaria espinal. El objetivo es la regeneración directa del tejido dañado, ofreciendo una vía potencial para la preservación del movimiento y la evitación de la fusión (18).

Discusión y Análisis Comparativo

Evaluación de la Evidencia Funcional y el Impacto en la Morbilidad

El análisis de la evidencia reciente confirma que el principal valor de las técnicas mínimamente invasivas radica en la reducción de la morbilidad perioperatoria y la aceleración de la recuperación. La superioridad del abordaje MIS-TLIF en los resultados funcionales a 12 meses (ODI) sugiere que la menor agresión tisular se traduce en una mejor calidad de vida a largo plazo para el paciente (7).

El caso de la Fusión y Descompresión Cervical Anterior Totalmente Endoscópica (eACDF) ilustra de manera contundente el impacto logístico y económico de la innovación. La capacidad de dar de alta al paciente en menos de 24 horas (9), con deambulación temprana y sin necesidad de opioides postoperatorios inmediatos, no solo beneficia la comodidad del paciente, sino que también optimiza masivamente los recursos hospitalarios. Este enfoque en la recuperación ultrarrápida (Enhanced Recovery After Surgery - ERAS) está impulsando un cambio fundamental en la relación costo-eficacia de la cirugía espinal, liberando camas y recursos de cuidados intensivos y marcando un nuevo estándar en el manejo hospitalario.

El Desafío de la Curva de Aprendizaje y la Seguridad Intraoperatoria

La adopción de nuevas tecnologías, especialmente la endoscopia pura y la robótica, implica inherentemente una curva de aprendizaje inicial. Aunque el riesgo de complicaciones perioperatorias puede ser elevado durante la fase de iniciación de la MIS (2), la evidencia muestra que la robótica actúa como un poderoso factor mitigador de riesgo.

Al estandarizar la colocación de implantes y lograr tasas de precisión de tornillos pediculares superiores al 95% (11), la robótica reduce la variabilidad entre cirujanos, per-

mitiendo que un mayor número de profesionales alcancen rápidamente un alto nivel de competencia y seguridad en la instrumentación compleja.

Además, la integración de la navegación y el TAC intraoperatorio aborda directamente la problemática identificada en la MIS lumbar: la alta exposición a la radiación fluoroscópica.¹ Al permitir la guía y confirmación de la colocación de implantes a través de imágenes 3D de un solo shot, estas tecnologías minimizan la necesidad de fluoroscopia continua, reduciendo la exposición ionizante tanto para el paciente como para el equipo quirúrgico (19).

Tabla 1. Resultados Comparativos de la Fusión Lumbar: MIS-TLIF vs. Cirugía Abierta

Métrica Comparativa	MIS-TLIF (n=25)	Cirugía Abierta (n=40)	Significado Clínico (P-valor)
ODI Preoperatorio (Media)	36.6	41.8	P>0.05
ODI a 12 meses (Media)	30.3	35.6	P<0.000
Exposición a Rayos X (mSv)	1.90	0.75	2.5x mayor en MIS
Tasa de Recuperación Laboral (3 meses)	~63% (Endoscopia)	ND	Recuperación acelerada

Fuente: Gimenez et al; Goldberg (7,8).

Tabla 2. Rendimiento y Precisión de la Cirugía Robótica en Fijación Espinal

Parámetro de Rendimiento	Rango de Precisión Reportado	Implicaciones
Tasa de Precisión de Tornillos Pediculares (GRS)	95.5% - 98.7%	Minimización del error iatrogénico en la colocación de implantes.

Indicaciones de Aplicación	de	Deformidad Espinal Adulta, Fijación Pedicular	Robótica segura y efectiva en casos complejos.
Beneficio en Morbilidad	en	Menos dolor, Menos complicaciones, Resultados más predecibles	Mejora de la seguridad y eficacia global.

Fuente: Khalifeh et al; Verduga Regalado (11,20).

**El Futuro de la Fusión: Interacción Im-
plante-Hueso**

La innovación en implantes mediante impresión 3D representa un cambio paradigmático. Los diseños 3D han transformado los implantes de estructuras puramente mecánicas a dispositivos bioactivos. Al incorporar propiedades como la estructura reticular porosa y la acción capilar, la tecnología 3D aborda directamente el reto biológico de la

no-unión (pseudoartrosis) que es común con materiales inertes (4).

La acción capilar, que facilita la absorción de fluidos y factores de crecimiento, asegura que el proceso de fusión sea activamente promovido por el diseño del implante, no solo por la biología del paciente. Este enfoque en la "activación biológica" de la fusión, además de la estabilidad mecánica, es crucial para garantizar resultados duraderos y constituye la frontera de la implantología axial.

Tabla 3. Propiedades Bioactivas de los Implantes de Fusión 3D (Impresión Aditiva)

Propiedad Diseñada 3D	Mecanismo Biológico/Mecánico	Resultado Clínico Optimizado
Estructura Reticular Porosa	Biomimetismo del hueso esponjoso; favorece la adaptación elástica.	Osteointegración superior y reducción de <i>stress shielding</i> .
Acción Capilar	Absorción activa de fluidos biológicos (sangre, médula ósea).	Acelera la interacción hueso-implante y la fusión.
Diseño Lordótico Específico	Corrección de la alineación y restauración de la curvatura fisiológica.	Mejora de los resultados funcionales a largo plazo.

Fuente: Medicon (4).

Conclusiones

Los avances en la cirugía del esqueleto axial desde 2020 han sido impulsados por la convergencia de la mínima invasión, la precisión asistida digitalmente y la bioingeniería de materiales. Las conclusiones fundamentales de esta revisión son las siguientes:

1. **Reducción de la Morbilidad Iatrogénica:** La cirugía mínimamente invasiva y la endoscopia avanzada, ejemplificadas por la técnica eACDF, han establecido nuevos umbrales de seguridad y recuperación, permitiendo el alta hospitalaria en menos de 24 horas en procedimientos de fusión complejos y reduciendo la morbilidad de tejidos blandos (9).
2. **Estandarización de la Precisión:** La robótica y la navegación intraoperatoria se han consolidado como herramientas esenciales, garantizando una precisión en la colocación de tornillos pediculares superior al 95% en cirugía de deformidad espinal (11). Esta precisión mitiga los riesgos inherentes de la colocación manual y ofrece una solución para contrarrestar la alta exposición a la radiación observada en los procedimientos MIS puramente fluoroscópicos (7).
3. **Innovación Biológica en Fusión:** La impresión 3D ha revolucionado la implantología al crear estructuras bioactivas (porosas, con acción capilar) que promueven activamente la osteointegración (4). Este cambio de enfoque, de la estabilización puramente mecánica a la activación biológica de la fusión, es crucial para el éxito a largo plazo de la cirugía de columna.

Para validar plenamente el beneficio clínico incremental de la robótica y las nuevas técnicas endoscópicas, es necesario realizar ensayos clínicos aleatorizados (ECA) con cohortes expandidas y un seguimiento a largo plazo (11). Las técnicas innovadoras han redefinido la expectativa de resultados, centrándose no solo en la eliminación de la

patología, sino también en la preservación funcional máxima y la rápida reintegración del paciente a sus actividades cotidianas.

Bibliografía

- Global Market Insights. Mercado de dispositivos de fusión espinal: por tipo de producto, por tipo de enfermedad, por cirugía, por tipo de material, por uso final - Pronóstico global, 2025-2034 [Internet]. 2024. Available from: <https://www.gminsights.com/es/industry-analysis/spinal-fusion-device-market>
- León JFR, Cuéllar GOA, Martínez CR, Ortiz JGR. Impacto de la cirugía mínimamente invasiva en cirugía de columna. Medicina (B Aires). 2019;41(2):145-55.
- ICAC. Operación de columna vertebral: testimonios y opiniones de pacientes reales [Internet]. 2021. Available from: <https://columna.com/testimonios-cirugia-columna/>
- medicon. Implantes para la columna vertebral [Internet]. [cited 2025 Oct 7]. Available from: <https://medicon.de/es/implantes-3d-para-la-columna-vertebral/>
- Muñoz P, Vivas A. Robotic guide system for insertion of screws in spinal fixation surgery. Rev Mex Ing Biomédica [Internet]. 2015 May 29;36(2):143-54. Available from: <http://www.rmib.somib.org.mx/pdfs/Vol36/No2/3.pdf>
- Zhang XY, Zhao JL, Wang YJ, Luan J, Lin HQ, Wang D. The Efficacy of the Minimally Invasive Lumbar Decompression (MILD®) Procedure: A PRISMA-compliant Systemic Review and Meta-analysis. Pain Physician. 2025;28(2):71-81.
- Gimenez E, Marcelo M, Raul S, Sero OA. COMPARATIVE RESULTS BETWEEN OPEN AND MINIMALLY INVASIVE FUSION IN LUMBAR DEGENERATIVE DISEASE. Coluna/Columna [Internet]. 2019 Dec;18(4):301-7. Available from: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1808-18512019000400301&tlng=en
- Goldberg G. Cómo puede ayudar la cirugía endoscópica de la columna vertebral a aliviar el dolor de espalda crónico [Internet]. 2024. Available from: <https://newjerseyspinespecialist.com/es/cirugia-endoscopica-de-columna-halp-con-dolor-de-espalda-cronico/>
- MIS. El Dr. Morgenstern desarrolla una nueva técnica quirúrgica de fusión endoscópica para la columna cervical publicada en la prestigiosa revista internacional de alto impacto NEUROSPINE [Internet]. 2025. Available from: <https://endoscopiacolumna.com/2025/01/03/publican/>

- Simal-Julián JA, Miranda-Lloret P, Pancucci G, Evangelista-Zamora R, Pérez-Borredá P, Sanromán-Álvarez P, et al. Endoscopia endonasal de base de cráneo. Neurocirugía [Internet]. 2013 Sep;24(5):210–5. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1130147313000845>
- Khalifeh K, Brown NJ, Pennington Z, Pham MH. Spinal Robotics in Adult Spinal Deformity Surgery: A Systematic Review. Neurospine [Internet]. 2024 Mar 31;21(1):20–9. Available from: <http://e-neurospine.org/journal/view.php?doi=10.14245/ns.2347138.569>
- Perlove. Sistema de navegación quirúrgica de columna: un avance en la cirugía de precisión [Internet]. 2025. Available from: <https://www.perlove.net/es/Sistema-de-navegación-quirúrgica-de-columna:-un-gran-avance-en-la-cirugía-de-precisión/>
- Wismeijer D. Impresión 3D para implantología [Internet]. [cited 2025 Oct 7]. Available from: <https://es.3dsystems.com/dental/3d-printing-implantology>
- Aguado Maestro I. Impresión 3D en Cirugía Ortopédica y Traumatología. Revisión sistemática de su aplicabilidad y estudio de los métodos de esterilización más adecuados para la utilización en quirófanos de las impresiones realizadas en el hospital. [Internet]. Universidad de Valladolid; 2023. Available from: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/61887>
- Tian X, Liu Y, Liu S, Tian Q, Raina DB, Gelinsky M, Zwingenberger S. Transforming spinal surgery with innovations in biologics and additive manufacturing. Mater Today Bio. 2025 May 13;32:101853. doi: 10.1016/j.mtbio.2025.101853
- Primo Capella V, Avila Carrasco C, Calero Martinez JA, García David S, Bracerías Izaguirre Í, Atienza Vicente CM. Nuevo biomaterial poroso de titanio. Rev biomecánica. 2012;58:67–9.
- Luengo-Matos S, Sánchez-Gómez LM, Hijas-Gómez AI, García-Carpintero EE, Ballesteros-Massó R, Polo-deSantos M. Efficacy and safety of robotic spine surgery: systematic review and meta-analysis. J Orthop Traumatol [Internet]. 2022 Dec 15;23(1):49. Available from: <https://jorthoptraumatol.springeropen.com/articles/10.1186/s10195-022-00669-0>
- Gilete. Medicina regenerativa neuroespinal: un enfoque integral para la restauración espinal sin cirugía [Internet]. [cited 2025 Oct 7]. Available from: <https://drgilete.com/es/innovacion-y-avances/medicina-regenerativa-neuroespinal/>
- MIS. Una nueva cirugía de columna sin dolor que permite una recuperación postoperatoria inmediata es presentada internacionalmente como primera mundial [Internet]. 2020. Available from: <https://endoscopiacolumna.com/2020/10/01/4809/>
- Verduga Regalado EF. Cirugía Robótica de Columna: Beneficios y avances en el tratamiento de patologías vertebrales [Internet]. 2025. Available from: <https://www.topdoctors.mx/articulos-medicos/cirugia-robotica-columna-beneficios-avances-tratamiento-patologias-vertebrales/>

CITAR ESTE ARTICULO:

Zambrano Figueroa, M. D. ., Luna Jiménez, C. M., De La Torre León, C. A. ., & Romero López, P. C. (2025). Técnicas innovadoras en cirugía del esqueleto axial . RECIMUNDO, 9(3), 31–41. [https://doi.org/10.26820/recimundo/9.\(3\).sep.2025.31-41](https://doi.org/10.26820/recimundo/9.(3).sep.2025.31-41)

