



CIRUGIA DE REVISION VERTEBRAL. OSTEOPOROSIS y MALPOSICION TORNILLOS PEDICULARES. EMPLEO DE LA IA EN LA PLANIFICACION QUIRURGICA CON GUIAS 3D DE REVISION

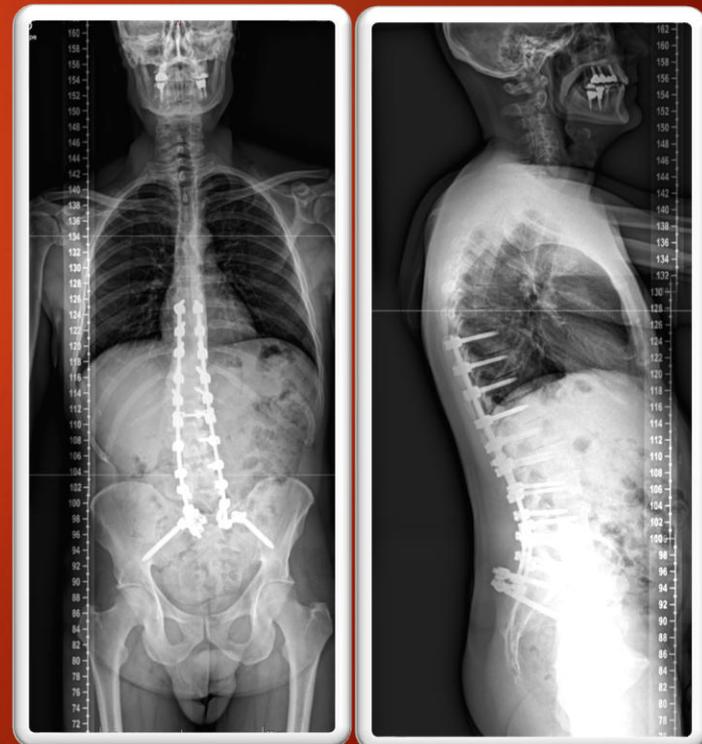
Mostaza Saavedra, A. L.; Mostaza Antolín, LM⁽¹⁾; Alonso Claro, G⁽¹⁾; Iglesias Diez, E⁽²⁾

Unidad de cirugía de raquis. Hospital San Juan de Dios; ⁽¹⁾ Servicio de Traumatología. CAULE; ⁽²⁾ Servicio de Neurocirugía CAULE

Introducción

La instrumentación transpedicular ha revolucionado la cirugía de columna, permitiendo la corrección de deformidades y la estabilización en patologías degenerativas. Sin embargo, la colocación subóptima de tornillos pediculares (malposición) sigue siendo un problema importante. Las malposiciones pueden provocar lesión de estructuras neurales o vasculares, dolor radicular e inestabilidad, a menudo requiriendo cirugías de revisión para extraer y recolocar los tornillos. Estudios clásicos reportan una precisión media de alrededor del 84% en la colocación de tornillos pediculares con técnica libre, que aumenta hasta ~95% con el uso de navegación asistida por imágenes. No obstante, la variabilidad es alta dependiendo del nivel espinal y la experiencia del cirujano; en niveles torácicos la tasa de malposición puede alcanzar el 30% en series con técnica libre.

Por otro lado, en pacientes con osteoporosis severa, incluso una colocación inicialmente correcta de los tornillos puede fracasar con el tiempo. La baja densidad ósea reduce la fijación del tornillo al pedículo, favoreciendo aflojamiento (osteólisis) y pseudoartrosis. Se han reportado tasas de aflojamiento de tornillos de hasta un 50- 60% en pacientes osteoporóticos a largo plazo, en contraste con <15% en pacientes con hueso normal. Este aflojamiento conlleva falla del constructo, pérdida de corrección y dolor, haciendo necesaria una revisión quirúrgica para reinstaurar la estabilidad.



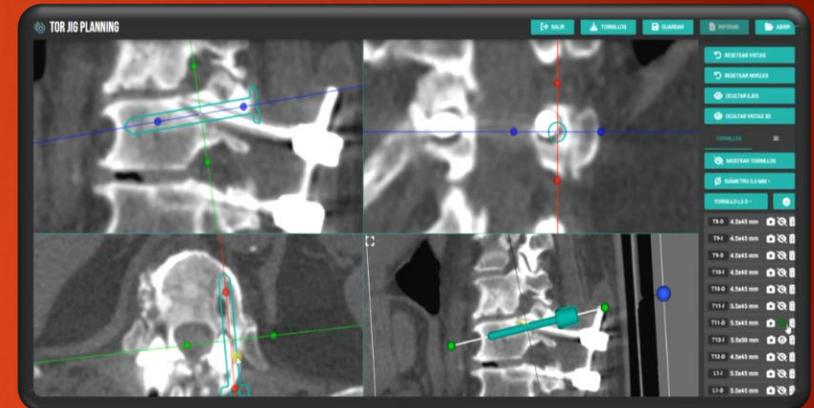
Material y Métodos

Diseño y pacientes

- I. Se realizó un estudio observacional retrospectivo entre diciembre de 2021 y octubre de 2024.
- II. Se intervinieron 190 pacientes (87 hombres, 103 mujeres; edad 26 a 86 años) con instrumentación transpedicular.
- III. Patologías: Espondilolistesis; Escoliosis del adulto; Estenosis lumbosacra severa; Patología degenerativa multisegmentaria
- IV. De los 190 pacientes, 14 personas (7.4%) requirieron cirugía de revisión pedicular por problemas relacionados con los implantes pediculares:
 - 11 casos por aflojamiento u osteólisis de tornillos (8 localizados en la unión lumbosacra L5-S1 y 3 en columna dorsal baja T10-T12)
 - 3 casos por franca malposición de tornillos (en T9, L5 y T12, este último asociado a déficit neurológico severo).

Planificación preoperatoria con IA y biomodelo

A todos los pacientes se les realizó un TAC de la columna para planificar la intervención. Se utilizó un software de planificación quirúrgica diseñado por nosotros con algoritmos de "deep learning" para sugerir trayectorias óptimas para los tornillos, considerando la morfología y densidad ósea, y evitando trayectorias de tornillos fallidos. Ingenieros biomédicos y cirujanos ajustaron las trayectorias para determinar la posición ideal de cada tornillo de reemplazo.



Diseño y fabricación de guías 3D para revisión: Se creó una guía quirúrgica personalizada para cada tornillo a reemplazar, ajustándose a la anatomía de la vértebra del paciente. Se utilizaron superficies óseas intactas como puntos de apoyo. Cada guía incluía un cilindro para dirigir la broca al ángulo planeado, y se imprimieron en 3D con resina biocompatible, siendo esterilizadas antes de su uso.

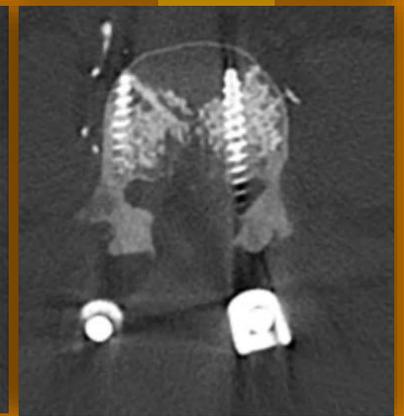
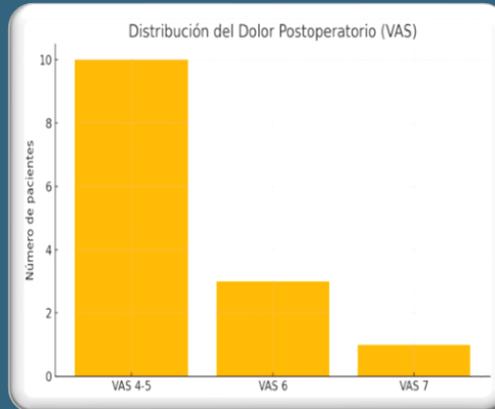
Adicionalmente, para cada caso se imprimió en 3D un biomodelo del nivel vertebral de interés utilizando resina biocompatible. Este modelo anatómico permitió examinar la patología vertebral y servir de referencia para el diseño

Resultados

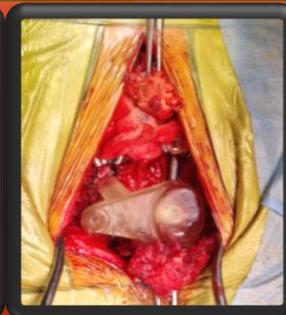
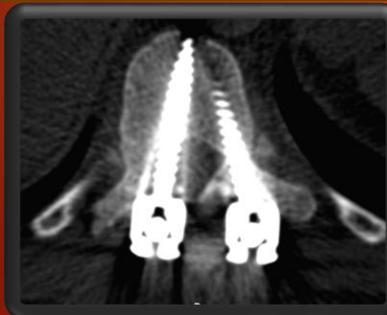
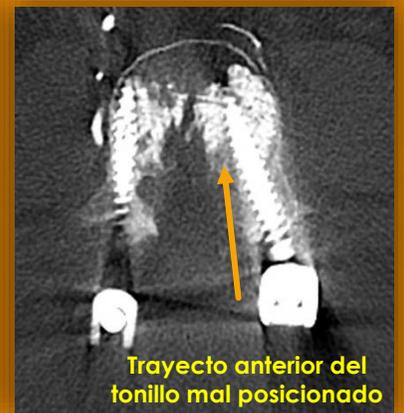
De los 14 pacientes incluidos, 9 mujeres y 5 varones, con edad promedio de 68.4 años (rango 42-82). Todos excepto 3 presentaban osteoporosis u osteopenia documentada (T-score < -1.5 en densitometría ósea). Las indicaciones iniciales de la cirugía (primera intervención) habían sido: escoliosis degenerativa del adulto (5 casos), espondilolistesis ístmicas o degenerativas (4 casos), estenosis espinal multisegmentaria (3 casos) y cifosis dolorosa por fracturas osteoporóticas (2 casos). El tiempo medio desde la cirugía inicial hasta la necesidad de revisión fue de 14 ± 8 meses. En 11 pacientes la revisión se indicó por aflojamiento de tornillos en segmentos instrumentados, con evidencia radiográfica de halos periprotésicos. En los otros 3, la indicación fue una mala colocación de uno o más tornillos pediculares detectada en el postoperatorio inmediato: dos de ellos con sintomatología radicular intensa (T9 y L5), y el tercero con déficit neurológico severo (tornillo de T12 protruyendo medialmente hacia el canal vertebral).

Resultados clínicos: Todos los pacientes mostraron mejoría en el dolor axial y/o radicular tras la revisión. La puntuación VAS media pre-revisión (8.2 ± 1.1) bajó a 4.9 ± 1.0 en la última evaluación postoperatoria. La mayoría (71%, 10/14) reportó dolor leve (VAS 4-5) después de la cirugía, mientras que 3 pacientes (21%) experimentaron dolor moderado (VAS 6) y solo 1 paciente tuvo un VAS de 7. Este último estaba relacionado con un tornillo T12 malposicionado; aunque recuperó la función neurológica, persistieron molestias dorso-lumbares por el traumatismo.

Ningún paciente reportó aumento del dolor, lo que demuestra el beneficio de la corrección de la fijación fallida.



Paciente	Mujer con estenosis de canal y espondiloartrosis multinivel, descompresión y artrodesis transpedicular L3-S1. Presentaba ciática y dolor insoportable por la extremidad inferior izquierda.
Patología	Malposición de tornillos pediculares izquierdos.
Tratamiento	Reubicación y reemplazo de tornillos mediante guías L3 a S1.



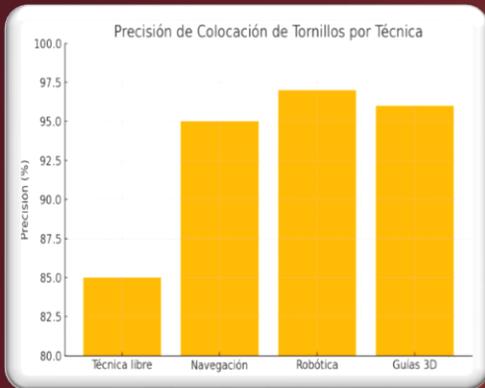
Tornillo T12 malposicionado y guía de revisión .Campo quirúrgico



GUIAS DE REVISION



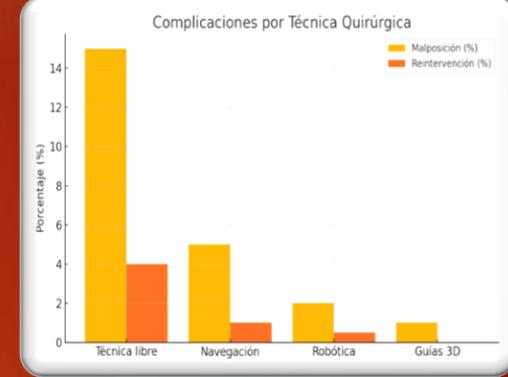
Discusión



La cirugía de revisión de columna es un campo desafiante donde confluyen factores adversos: anatomía distorsionada por la cirugía previa, presencia de material protésico, osteopenia /osteoporosis subyacente y tejido cicatricial que dificulta la orientación. En este contexto, mantener una alta precisión en la colocación de nuevos tornillos pediculares es fundamental para garantizar el éxito

de la revisión y minimizar la morbilidad adicional. Nuestra experiencia con guías 3D personalizadas planeadas mediante IA demuestra que es posible lograr una recolocación segura y exacta de los tornillos en estos casos complejos, con resultados clínicos favorables y sin malposiciones residuales ni reintervenciones adicionales en el corto-mediano plazo.

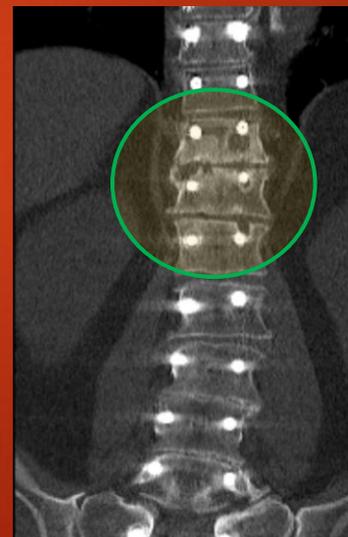
Tasa estimada de complicaciones relacionadas con la colocación de tornillos pediculares: Según la técnica empleada, basada en datos de series publicadas y meta-análisis. En rojo se indica el porcentaje de tornillos mal posicionados (brecha cortical significativa o posición subóptima con riesgo), y en verde la tasa de cirugías de revisión requeridas debido a mal-posición. Las técnicas asistidas (navegación, robótica, guías 3D) superan clara-



mente a la técnica de manos libres en seguridad, reduciendo las malposiciones y prácticamente eliminando la necesidad de reintervenir por error de colocación. En nuestra serie con guías 3D no se registraron malposiciones ni reintervenciones, alineado con esta tendencia.

Ventajas y desventajas en cirugía de revisión:

La navegación y la robótica pueden verse afectadas en cirugías de revisión por la presencia de artefactos metálicos o la falta de referencias anatómicas intactas. La alineación del navegador puede ser imprecisa si hay movimiento en la columna o si los marcadores están en hueso inestable. La robótica a menudo requiere imágenes intraoperatorias adicionales para el registro, lo que se complica con los implantes previos. Por otro lado, las guías 3D utilizan información preoperatoria y se adaptan a la anatomía del paciente, proporcionando estabilidad incluso con deformidades. Este enfoque innovador permite posicionar la guía al implante existente, ofreciendo mayor estabilidad en revisiones. En contraste, la robótica en revisiones puede necesitar la extracción de todos los implantes, lo que provoca pérdida de referencia mecánica.



RADIACION Y TIEMPO QUIRURGICO:

Nuestras cirugías de revisión utilizaron guías sin fluoroscopia continua, lo que redujo la exposición radiológica del equipo. La navegación tradicional con fluoroscopia implica dosis para el paciente y el equipo, mientras que la navegación con TAC intraoperatorio se centra en el paciente y minimiza la exposición del equipo. Las guías 3D eliminan la necesidad de imágenes durante la cirugía, ahorrando tiempo en la verificación de tornillos. El tiempo total de nuestras revisiones se comparó favorablemente con cirugías estándar de complejidad similar, sin un aumento significativo del tiempo, lo cual es positivo, ya que la robótica suele asociarse con tiempos prolongados.

COMPLICACIONES:

No se registraron complicaciones intraoperatorias mayores. No hubo lesiones vasculares, ni infecciones postquirúrgicas en la serie. Tampoco se observaron fallos tempranos de los nuevos tornillos ni pérdidas de corrección durante un seguimiento medio de 12 meses (rango 3–36 meses). Hasta la fecha de corte del estudio, ningún paciente requirió una nueva reintervención tras la cirugía de revisión con guías 3D. Esto contrasta positivamente con las tasas de reoperación por tornillos mal colocados reportadas históricamente con técnica de manos libre, que pueden alcanzar el 5% incluso en centros experimentados.

Conclusiones

- I. La cirugía de revisión vertebral en pacientes con tornillos pediculares mal posicionados o aflojados continúa siendo un reto importante en la práctica de la columna. Las técnicas convencionales presentan limitaciones significativas: la técnica de manos libres tiene un riesgo elevado de nueva malposición, la navegación y robótica, si bien mejoran la precisión, pueden ser complejas de implementar en presencia de hardware previo y de una anatomía alterada.
- II. Nuestro estudio muestra que la planificación preoperatoria con deep learning y guías quirúrgicas 3D personalizadas es efectiva en revisiones complejas. En 14 pacientes, implantamos nuevos tornillos pediculares con un 100% de precisión, mejorando el déficit neurológico y eliminando el dolor radicular, sin complicaciones adicionales. Los pacientes experimentaron una notable mejoría clínica y no necesitaron nuevas intervenciones durante el seguimiento.
- III. Desde una perspectiva de seguridad y eficacia, esta técnica ofrece importantes beneficios: reduce el riesgo de errores humanos en la colocación del tornillo, previene la exposición a radiación durante la cirugía y proporciona confianza al cirujano en huesos de baja calidad. Las tasas de éxito son similares o superiores a otros métodos. Por ello, recomendamos considerar el uso de IA para la planificación y guías 3D personalizadas para cirujanos de columna, especialmente en casos complejos.
- IV. Se necesitan más estudios extensos para validar estos hallazgos y facilitar la adopción de la técnica. Sin embargo, nuestros resultados apoyan firmemente su efectividad, mejorando los resultados en pacientes más difíciles.