

Impresión 3D aplicada a la planificación y la resolución quirúrgicas en la cirugía ortopédica. Serie de casos

Mauro R. Vivas, Esteban Raiti Sposato, Pablo Bizzarri, Ezequiel E. Román, Ariel Lías

Sector de Miembro Inferior, Hospital de Alta Complejidad El Cruce SAMIC, Buenos Aires, Argentina

RESUMEN

Introducción: La popularidad de la cirugía asistida con impresión 3D ha crecido en los últimos 10 años. El poco empleo en nuestro medio no permite aprovechar para el paciente todas las aplicaciones y los beneficios de esta herramienta. **Materiales y Métodos:** Estudio retrospectivo sobre enfermedad del miembro inferior en pacientes tratados en nuestra institución analizando cada etapa del proceso y su utilidad en la planificación, la ejecución quirúrgica y el desarrollo de implantes. **Resultados:** Se describen 12 casos en los que se utilizó la impresión 3D para tratar defectos acetabulares, resecciones tumorales óseas y secuelas en huesos largos. **Conclusiones:** Nuestra serie y la bibliografía revisada demuestran que la cirugía asistida con impresión 3D mejora la predictibilidad con lo planificado y reduce los tiempos quirúrgicos, el sangrado y la radiación intraoperatoria, a un costo accesible. Además, no se han comunicado complicaciones asociadas a esta tecnología.

Palabras clave: Impresión 3D; fabricación aditiva; modelos anatómicos; implantes a medida.

Nivel de Evidencia: IV

3D Printing for Surgical Planning and Resolution in Orthopaedic Surgery. Case Series

ABSTRACT

Introduction: The popularity of 3D printing-assisted surgery has surged over the previous decade. The tool's limited use in our context prevents us from taking advantage of all of its applications and benefits for the patient. **Materials and Methods:** A retrospective study on lower limb disease in patients treated at our institution, analyzing each stage of the procedure and its applicability in planning, surgical execution, and implant development. **Results:** We describe 12 cases in which 3D printing was used to treat acetabular defects, bone tumor resections, and long bone sequelae. **Conclusions:** Our series and the literature reviewed demonstrate that 3D printing-assisted surgery improves plan predictability while also reducing surgical times, bleeding, and intraoperative radiation at a reasonable cost. Furthermore, no complications from this technology have been reported.

Keywords: 3D printing; additive manufacturing; anatomical models; custom implants.

Level of Evidence: IV

INTRODUCCIÓN

La impresión 3D, también conocida como fabricación aditiva, fue una técnica pionera cuando se introdujo, en la década de 1980, con fines industriales y de ingeniería.¹ La tecnología de impresión 3D tiene cada día más aplicación en el sector de la salud, debido al costo cada vez menor y su mayor accesibilidad. Existe un interés creciente que se ve reflejado en el aumento de publicaciones desde 2014.² En la actualidad, la impresión 3D de los segmentos óseos por tratar se ha convertido en una herramienta que mejora la interpretación, planificación y ejecución del acto quirúrgico, principalmente en cuadros complejos o atípicos.³ El diseño de las impresiones comienza con las imágenes DICOM (*Digital Imaging and COmmunications in Medicine*) de tomografía o resonancia magnética a partir de las cuales se realiza la segmentación y la posterior impresión de la región por tratar. Desde el punto de vista costo-beneficio, la cirugía asistida con impresión 3D es una alternativa atractiva para aquellas instituciones

Recibido el 20-7-2023. Aceptado luego de la evaluación el 12-2-2024 • Dr. MAURO R. VIVAS • vivasmauro@hotmail.com  <https://orcid.org/0000-0002-3820-9745>

Cómo citar este artículo: Vivas MR, Raiti Sposato E, Bizzarri P, Román EE, Lías A. Impresión 3D aplicada a la planificación y la resolución quirúrgicas en la cirugía ortopédica. Serie de casos. *Rev Asoc Argent Ortop Traumatol* 2024;89(3):257-265. <https://doi.org/10.15417/issn.1852-7434.2024.89.3.1798>

que no pueden solventar procedimientos navegados.⁴ A partir de estos modelos digitales, también, es posible el desarrollo de instrumentos específicos para el paciente, como guías de corte, montajes finales de tutor externo o guías para la colocación de implantes, descritos, por primera vez, en 1999, por Radermacher y cols.⁵

Debido a que aún no es una práctica habitual en el campo ortopédico, la experiencia tanto del cirujano como de los bioingenieros es poca y requiere retroalimentación constante entre las necesidades quirúrgicas del cirujano y las alternativas que el bioingeniero puede ofrecer.

Nuestro objetivo es describir una serie de casos en los que se utilizó la impresión 3D para la planificación y resolución quirúrgica de pacientes con un cuadro ortopédico, analizando cualitativamente las etapas en las que se utilizó, sus beneficios y complicaciones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se llevó a cabo un estudio de una serie de casos en el que se analizó, de manera retrospectiva, a pacientes tratados en el Sector de Miembro Inferior del Servicio de Ortopedia y Traumatología de nuestra institución desde su inicio hasta marzo de 2022. Los criterios de inclusión definidos fueron: afección en el miembro inferior (de pelvis a pie) y uso de impresión 3D en cualquier etapa del proceso asistencial. Los criterios de exclusión fueron: seguimiento <2 años en pacientes sometidos a una artroplastia.

Se recolectó la siguiente información de cada caso: proceso de diseño y desarrollo, momento de uso de la impresión 3D (planificación, ejecución o diseño protésico), tipo de diseño para la ejecución y si hubo complicaciones asociadas al uso de las impresiones.

El proceso de trabajo para el diseño de las impresiones fue el siguiente (Figuras 1 y 2):

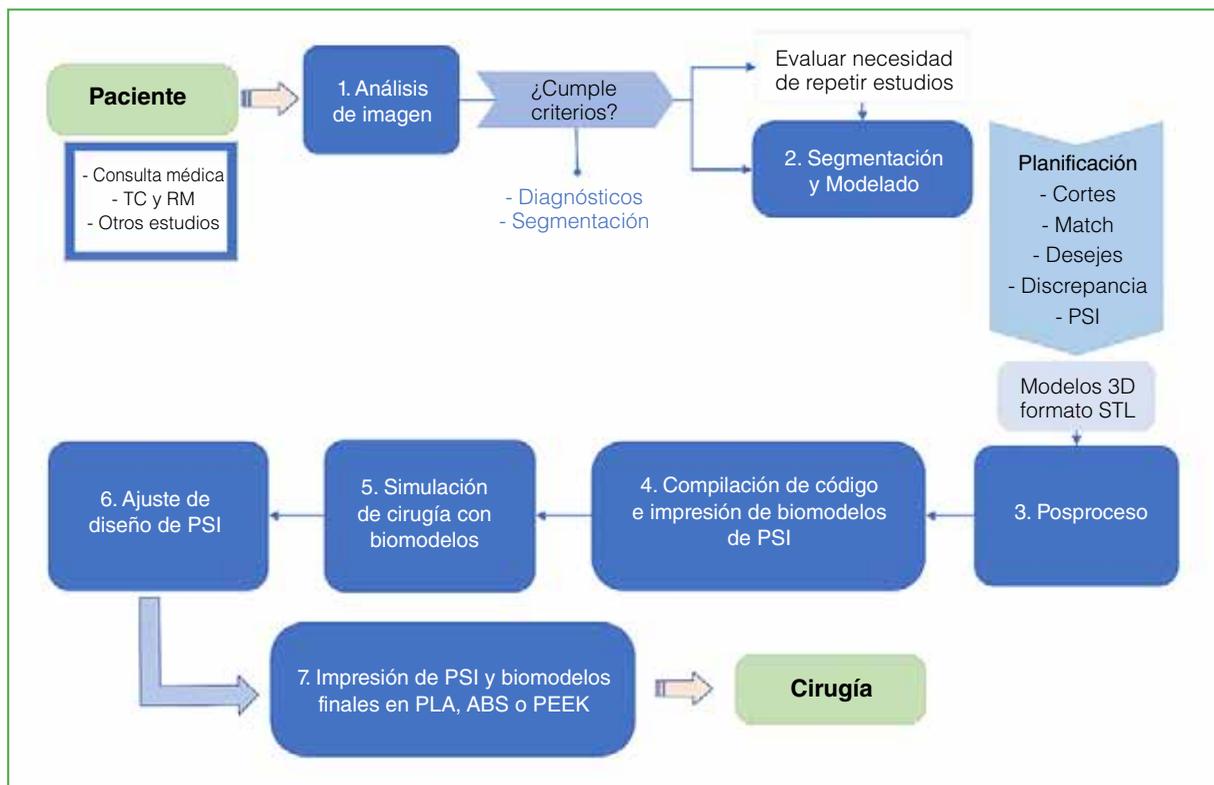


Figura 1. Proceso de trabajo estándar para el uso de tecnología 3D.

1. Análisis de imagen en RadiAnt.
 - a) Tomografías (con contraste), con cortes de 1 mm de espesor y matriz cuadrada de 512 x 512.
 - b) Resonancia, sin parámetros específicos de adquisición de imagen.
2. Segmentación y modelado en 3D Slicer.
3. Posprocesado en MeshMixer y Blender.
4. Compilado de código en Simplify para impresión aditiva del modelo 3D de prueba con o sin diseño de guías o implante en AutoDesk Fusion.
5. Simulación quirúrgica y evaluación de resultados en los modelos.
6. Diseño de guías e implantes en AutoDesk Fusion según pruebas.
7. Procedimiento quirúrgico en el paciente.

Los pasos 4, 5 y 6 se pueden reiterar hasta lograr el diseño que cumpla con las especificaciones del caso por resolver. Durante el proceso, se realizaron reuniones presenciales o virtuales con bioingeniería. Cuando los casos eran más complejos, se utilizaba, además, un registro diario escrito de avances y obstáculos en GoogleDocs.

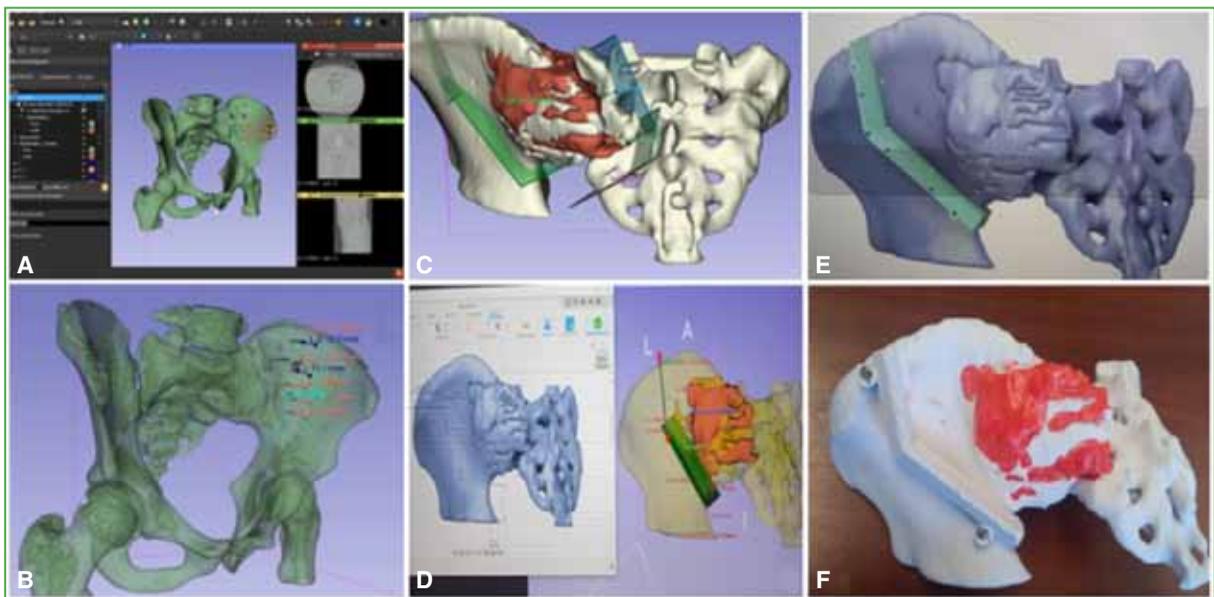


Figura 2. Flujo de trabajo para las guías de corte para un condrosarcoma grado 2 en la zona IV de Enneking de la pelvis. **A.** Segmentación, análisis y marcación del margen quirúrgico. **B.** Determinación del plano de osteotomía ilíaca. **C.** Modelo 3D (tumor en rojo) con planos de osteotomía ilíaca y sacra. **D.** Diseño de guía de corte según la planificación. **E.** Diseño final de guía y prueba de congruencia. **F.** Biomodelo y guía impresa lista para prueba.

RESULTADOS

Nuestra serie incluyó 12 casos en los que se utilizó la impresión 3D para el diagnóstico, la planificación y el tratamiento. En ocho pacientes, el proceso se realizó íntegramente en nuestro hospital y, en los cuatro restantes, fue necesaria la intervención de otra institución para la impresión de implantes en titanio. Respecto a los instrumentos específicos para el paciente, se diseñaron guías de corte en cinco casos y un molde a medida para espaciador con cemento antibiótico. Se fabricaron tres implantes acetabulares a medida, dos de ellos requirieron la confección adicional de guías para la colocación de tornillos (Figura 3).

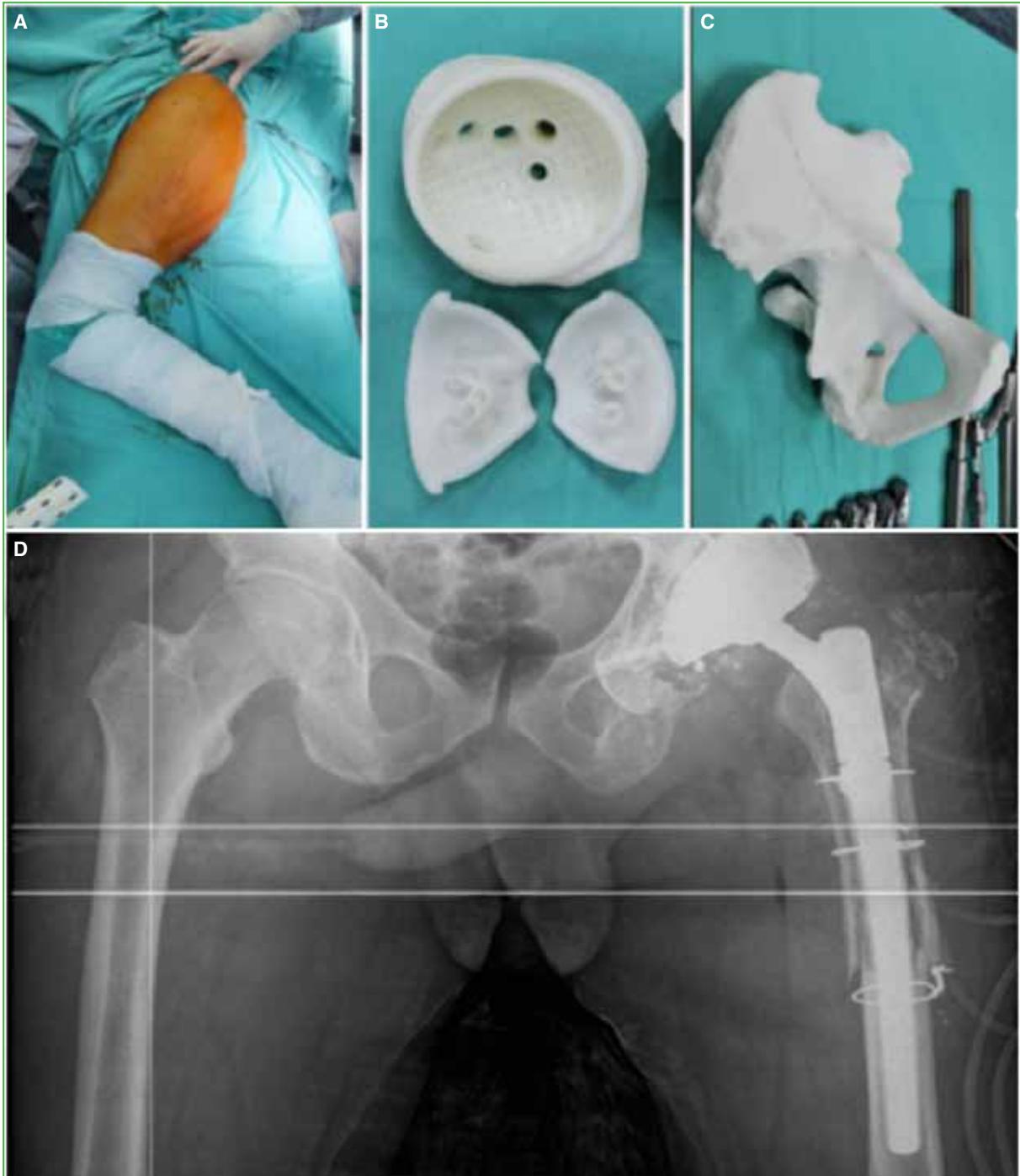


Figura 3. Caso 1. Mujer de 53 años con defecto acetabular severo. Desarrollo de implantes personalizados y guía para tornillos. A-C. Imágenes intraoperatorias. D. Radiografía de ambas caderas, de frente. Resultado posquirúrgico.

En cuanto a los pacientes, cinco eran mujeres y siete, hombres. La edad promedio era de 39 años. En los pacientes jóvenes (promedio 26 años), fueron más frecuentes la enfermedad tumoral o las secuelas, mientras que, en los mayores (promedio 60 años), lo más habitual fueron las complicaciones de artroplastia.

Los cuadros tratados fueron: corrección de deformidades postraumáticas, secuela de pie bot, resecciones oncológicas óseas y reconstrucción de defectos acetabulares complejos (Tabla).

Tabla. Descripción del cuadro y aplicación de la impresión 3D durante el tratamiento

Paciente	Sexo	Edad	Cuadro	Planificación	Ejecución (PSI)	Implante personalizado	Proceso
1	F	53	Defecto acetabular	Sí	Guía de tornillo	Sí	Tercerizado
2	M	82	Defecto acetabular	Sí	Guía de tornillo	Sí	Tercerizado
3	F	63	Consolidación viciosa de tibia	Sí	Montaje de tutor		Institucional
4	M	25	Seudoartrosis de tibia	Sí	Guía de corte		Institucional
5	M	17	Secuela de pie bot	Sí			Institucional
6	F	12	Condrosarcoma de sacro/pelvis	Sí	Guía de corte		Institucional
7	M	24	Osteosarcoma de sacro/pelvis	Sí			Institucional
8	M	21	TCG de fémur distal	Sí	Guía de corte		Institucional
9	F	26	Secuela postraumática de fémur	Sí	Guía de corte	Sí	Tercerizado
10	M	59	Fractura periprotésica infectada	Sí	Molde espaciador		Institucional
11	M	47	Defecto acetabular	Sí		Sí	Tercerizado
12	M	21	TCG de fémur distal	Sí	Guía de corte		Institucional

M = masculino; F = femenino; TCG = tumor de células gigantes.

Se realizó la planificación digital en todos los pacientes utilizando los programas disponibles principalmente para mediciones y determinación de márgenes oncológicos, ángulos de osteotomía, cuantificación del volumen de injerto requerido o stock óseo disponible para la colocación de implantes. Los procedimientos quirúrgicos se desarrollaron según lo planificado y con los biomodelos impresos. No fue necesario ningún procedimiento intraquirúrgico adicional a los planificados. En los pacientes con enfermedad tumoral y aloinjerto, el plan quirúrgico inicial se modificó luego de la disponibilidad de los biomodelos; estas modificaciones consistieron principalmente en la localización de los planos de resección (Figura 4). En casos de reconstrucción con aloinjerto, fue posible la conformación de dos equipos quirúrgicos simultáneos, uno a cargo de la resección oncológica y otro, del procesamiento del injerto de banco; ocurrió algo similar en el caso del espaciador de cemento a medida, donde un equipo estuvo a cargo de la limpieza, mientras otro conformaba el espaciador.

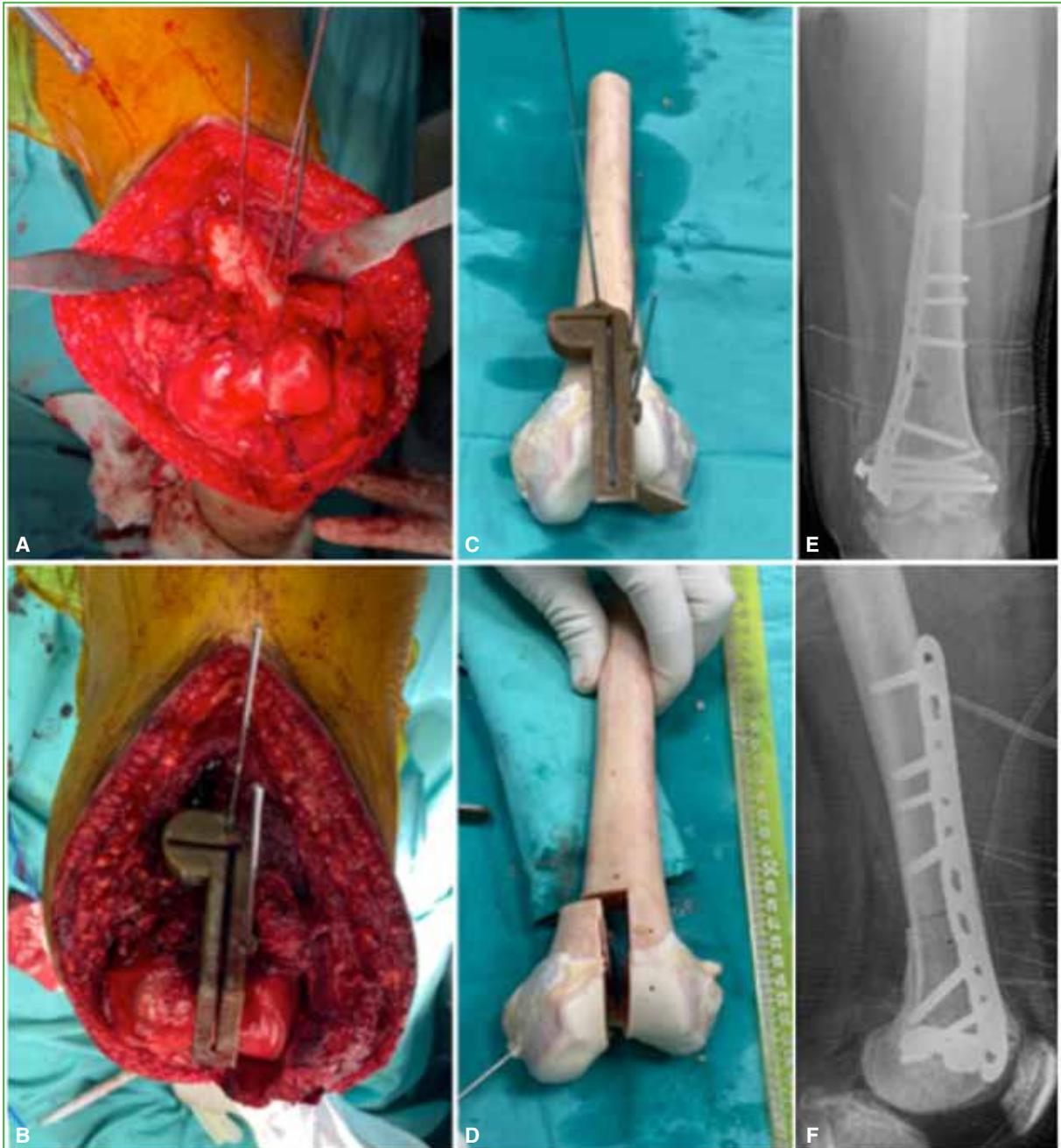


Figura 4. Caso 8. Hombre de 21 años. Resección del tumor y reconstrucción con injerto óseo estructural. **A y B.** Resección tumoral con guía 3D. **C y D.** Sección de hueso estructural con guía para la correcta congruencia con el hueso del paciente. **E y F.** Radiografías de rodilla izquierda. Control posquirúrgico.

Una situación similar se dio con el montaje previo del tutor externo circular (**Figura 5**), el cual se diseñó sobre un biomodelo impreso y luego fue esterilizado ensamblado. En el momento de la intervención, únicamente fue necesario posicionar los tornillos de Schanz en los sitios previstos según la planificación 3D y acoplarlos a los anillos.

El uso de la radioscopia se limitó a la comprobación de los planos de osteotomía y la posición de implantes e injertos al final de la intervención.



Figura 5. Caso 3. Mujer de 63 años. Consolidación viciosa. Se realiza la impresión del segmento por tratar para un montaje adecuado y más preciso antes de la cirugía.

Se necesitaron, en promedio, cinco reuniones entre profesionales médicos y de bioingeniería por paciente. Cuando se desarrollaron implantes o instrumentos específicos, se mantuvieron más reuniones que cuando solo se realizó la planificación digital.

Ningún implante personalizado estaba flojo a los dos años de seguimiento.

En la serie de casos descritos, no se produjeron complicaciones posquirúrgicas asociadas al uso de esta herramienta en la ejecución, tanto en la colocación de implantes como en las guías de corte.

DISCUSIÓN

La impresión 3D es una herramienta que brinda información para educación y capacitación de profesionales, como así también para la planificación y el tratamiento en condiciones quirúrgicas complejas o atípicas. En una revisión de 227 artículos, se demostró que la aplicación de esta tecnología disminuye el tiempo quirúrgico, mejora los resultados y reduce la exposición a la radiación.⁶ Esto ocurrió también en nuestra serie, ya que la conformación de dos equipos simultáneos permitió reducir los tiempos de procesamiento de injerto o conformación de espaciadores. El uso de guías de corte derivó en la disminución del tiempo total de radioscopia, ya que no fue necesario determinar el nivel de las osteotomías ni realizar nuevas mediciones durante la cirugía.

Contar con el tutor externo circular ya conformado permitió reducir al mínimo el tiempo de ensamblaje intraquirúrgico.

En una publicación de 2019, se analizó el cambio de interpretación y planificación de fracturas de tibia distal por parte de cirujanos principiantes y experimentados. Luego de utilizar la impresión 3D para la planificación, el 74% y el 9%, respectivamente, cambiaron su planificación y abordaje.⁷ En nuestra serie, los biomodelos nos permitieron prever dificultades y mejorar la precisión del plan quirúrgico, como en el caso de deformidades triplanares donde se ensayaron diversas configuraciones de tutor circular hasta lograr un diseño adecuado y compatible con las osteotomías propuestas, o los casos de aloinjerto de banco en los que se modificaron los planos de corte para maximizar la compatibilidad anatómica entre donante y paciente.

El diseño de guías de corte para resección de tumores en la pelvis fue analizado en un estudio experimental con 10 especímenes cadavéricos y se halló un error medio no estadísticamente significativo comparado con las cirugías navegadas.⁸ Además, reduce la curva de aprendizaje y la experiencia acumulada para lograr resultados similares entre cirujanos jóvenes y profesionales especializados.⁷ En nuestros pacientes, las guías permitieron lograr una correcta reproducibilidad entre lo planificado y lo ejecutado en el quirófano. Otro uso para las guías de corte fue lograr una adecuada congruencia en las reconstrucciones con aloinjerto, en pacientes con resecciones oncológicas, de acuerdo con los principios de las técnicas quirúrgicas, para maximizar las posibilidades de integración.^{8,9}

El material empleado en las impresiones para la planificación fue PLA (ácido poliláctico), un plástico proveniente de materias primas, como el almidón, la tapioca o la caña de azúcar. Este plástico es ecológico y renovable, y a cierta temperatura y humedad, puede ser biodegradable, cualidad que lo convierte en seguro para el medio ambiente. El material elegido para las guías de corte fue PEEK (polieteretercetona), un polímero que se utiliza para el diseño y la fabricación de prótesis e implantes con adecuada resistencia mecánica y biocompatibilidad, ya que contamos con una impresora apta para este material.^{10,11}

La aplicación de tecnología 3D ofrece beneficios cualitativos y de percepción táctil que otros métodos no brindan; en este punto, es donde se dificulta la comparación con otras tecnologías de vanguardia, como la navegación, la realidad aumentada y la robótica. Hasta la fecha, no hemos encontrado estudios que comparen los resultados de todas estas técnicas entre sí.

Consideramos como debilidades de este análisis la muestra pequeña y de composición heterogénea. En el caso de implantes personalizados, el seguimiento a largo plazo es solo a dos años (1 caso con seguimiento de 5 años).

Al analizar las desventajas o complicaciones en las cirugías asistidas con impresión, no hemos encontrado complicaciones asociadas al uso de esta herramienta; por lo tanto, la consideramos una herramienta inocua para el procedimiento. Como desventajas podemos afirmar que, al encontrarnos en etapa de aprendizaje, la planificación y el diseño requirieron de muchas horas de trabajo y retroalimentación con los bioingenieros para lograr el resultado esperado.

Es importante remarcar que es el primer programa de cirugía asistida con impresión 3D con cirujanos y bioingenieros de la misma institución de carácter público en el país.

CONCLUSIONES

La impresión 3D como herramienta complementaria de la planificación y ejecución de procedimientos quirúrgicos mejora la reproducibilidad entre lo planificado y lo ejecutado en el acto quirúrgico reduciendo los tiempos de cirugía, la exposición a la radiación y permitiendo detectar anticipadamente posibles complicaciones. También debemos remarcar que es una herramienta que no representa costos elevados, como la cirugía navegada, y que, hasta la fecha, no se ha comunicado ninguna complicación asociada a su uso.

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

Dr. Esteban Raiti Sposato: <https://orcid.org/0000-0003-0130-3313>
 Dr. Pablo Bizarri: <https://orcid.org/0000-0002-2796-530X>

Dr. Ezequiel E. Román: <https://orcid.org/0000-0002-0675-6787>
 Dr. Ariel Lías: <https://orcid.org/0000-0002-8504-2255>

BIBLIOGRAFÍA

1. Segaran N, Saini G, Mayer JL, Naidu S, Patel I, Alzubaidi S, et al. Application of 3D printing in preoperative planning. *J Clin Med* 2021;10(5):917. <https://doi.org/10.3390/jcm10050917>
2. Weidert S, Andress S, Suero E, Becker C, Hartel M, Maren Behle, et al. 3D-Druck in der unfallchirurgischen Fort- und Weiterbildung. *Unfallchirurg* 2019;122:444-51. <https://doi.org/10.1007/s00113-019-0650-8>
3. Feng Y, Zhu S, Mei D, Li J, Zhang J, Yang S, et al. Application of 3D printing technology in bone tissue engineering: A review. *Curr Drug Deliv* 2021;18(7):847-61. <https://doi.org/10.2174/1567201817999201113100322>
4. Mardis NJ. Emerging technology and applications of 3D printing in the medical field. *Mo Med* 2018;115(4):368-73. PMID: 30228770
5. Radermacher K, Portheine F, Anton M, Zimolong A, Kaspers G, Rau G, et al. Computer assisted orthopaedic surgery with image based individual templates. *Clin Orthop Relat Res* 1998;(354):28-38. <https://doi.org/10.1097/00003086-199809000-00005>
6. Tack P, Victor J, Gemmel P, Annemans L. 3D-printing techniques in a medical setting: a systematic literature review. *Biomed Eng OnLine* 2016;15(1):115. <https://doi.org/10.1186/s12938-016-0236-4>
7. Hwa Jun Kang, Bom Soo Kim, Seung Min Kim, Yu Mi Kim, Hyong Nyun Kim, Jae Yong Park, et al. Can preoperative 3D printing change surgeon's operative plan for distal tibia fracture? *Biomed Res Int* 2019;2019:7059413. <https://doi.org/10.1155/2019/7059413>
8. Mediavilla-Santos L, García-Sevilla M, Calvo-Haro JA, Ruiz Alba MT, Pérez-Mañanes R, Pascau González J, et al. Validación de los modelos de impresión 3D paciente-específicos para cirugía ortopédica oncológica pélvica. *Rev Esp Cir Ortop Traumatol* 2022;66(5):403-9. <https://doi.org/10.1016/j.recot.2022.07.011>
9. Gauci MO. Patient-specific guides in orthopedic surgery. *Orthop Traumatol Surg Res* 2022;108(1S):103154. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2021.103154>
10. Czyżewski W, Jachimczyk J, Hoffman Z, Szymoniuk M, Litak J, Maciejewski M, et al. Low-cost cranioplasty-A systematic review of 3D printing in medicine. *Materials (Basel)* 2022;15(14):4731. <https://doi.org/10.3390/ma15144731>
11. González-Henríquez CM, Sarabia-Vallejos MA, Rodríguez-Hernandez J. Polymers for additive manufacturing and 4D-printing: Materials, methodologies, and biomedical applications. *Progress in Polymer Science* 2019;94:57-116. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2019.03.001>