



DOI: <https://doi.org/10.46296/yc.v10i18.0904>

IMPRESIÓN 3D EN CIRUGÍA DE MANO: ¿REDUCE TIEMPO QUIRÚRGICO, FLUOROSCOPIA Y MEJORA LA PLANIFICACIÓN EN FRACTURAS COMPLEJAS?

3D PRINTING IN HAND SURGERY: DOES IT REDUCE OPERATIVE TIME, FLUOROSCOPY, AND IMPROVE PLANNING IN COMPLEX FRACTURES?

Cumplido-Simanca Juliana ¹; Borráez-Hernández Laura Vanessa ²;
Mercado-Marchena Sherim Adriana ³; Arias-González Manuela ⁴;
Mancilla-Herrera Natalia ⁵; Ramirez-Quintero Sebastian ⁶; Pérez-Rodríguez Santiago ⁷;
Suárez-Cárdenas Laura Sophia ⁸; Camelo-Motta Carlos Felipe ⁹

¹ Universidad del Sinú. Montería, Colombia.

Correo: ulianacumplido@hotmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-6995-3246>

² Unisanitas. Bogotá, Colombia.

Correo: lv.borraez38@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-9017-7232>

³ Universidad Simón Bolívar. Barranquilla, Colombia.

Correo: smercado1703@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-7148-3435>

⁴ Universidad Autónoma de Bucaramanga. Bucaramanga, Colombia.

Correo: manuela.arias.gonzalez22@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-0179-7169>

⁵ Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

Correo: namahe8@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-1894-2278>

⁶ Universidad Libre. Cali, Colombia.

Correo: seraqui3000@hotmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-3519-7098>

⁷ Universidad Libre. Cali, Colombia.

Correo: santiago7perez@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-6142-1128>

⁸ Fundación Universitaria Sanitas. Bogotá, Colombia.

Correo: sophysuarezcardenas@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-9999-2081>

⁹ Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.

Correo: cafecamo@hotmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-3846-1955>

Resumen

Se realizó una revisión crítica narrativa para evaluar el papel de la impresión tridimensional en cirugía de mano aplicada a fracturas complejas, con énfasis en tiempo quirúrgico, fluoroscopia y planificación preoperatoria. Se buscaron estudios en PubMed/MEDLINE, Embase, Scopus y ScienceDirect entre 2016 y marzo de 2026. Se incluyeron revisiones sistemáticas, ensayos, cohortes, series de casos y estudios cadavéricos sobre radio distal, escafoides y maluniones. La evidencia sugirió que la principal fortaleza de esta tecnología fue mejorar la comprensión anatómica y la planificación personalizada. En fracturas intraarticulares del radio distal y en osteotomías correctivas, varios estudios mostraron reducciones modestas del tiempo quirúrgico y de la fluoroscopia, pero sin beneficio funcional consistente. En el escafoides, las guías específicas del paciente mejoraron la centralidad del tornillo y redujeron intentos de inserción. Se concluyó que la impresión tridimensional parece más útil en casos complejos seleccionados y que su adopción debe evaluarse con diseños antes-después.

Palabras claves: Impresión Tridimensional; Cirugía de la Mano; Fracturas Óseas; Planificación Preoperatoria; Fluoroscopia.

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 11 de marzo de 2026.

Fecha de aceptación: 20 de mayo de 2026.

Fecha de publicación: 18 de junio de 2026.



Abstract

A critical narrative review was conducted to evaluate the role of three-dimensional printing in hand surgery for complex fractures, with emphasis on operative time, fluoroscopy and preoperative planning. Studies were searched in PubMed/MEDLINE, Embase, Scopus and ScienceDirect from 2016 to March 2026. Systematic reviews, trials, cohorts, case series and cadaver studies on distal radius, scaphoid, malunions and reconstructive wrist and distal forearm surgery were included. Evidence suggested that the main strength of this technology was improved anatomic understanding and personalized planning. In intra-articular distal radius fractures and complex corrective osteotomies, several studies showed modest reductions in operative time and fluoroscopy, but no consistent functional benefit. In scaphoid surgery, patient-specific guides improved screw centrality and reduced insertion attempts. Three-dimensional printing appeared to be most useful in selected complex cases, and its implementation should be evaluated with before-after designs.

Keywords: Printing, Three-Dimensional; Hand Surgery; Fractures, Bone; Preoperative Planning; Fluoroscopy.

1. Introducción

La impresión tridimensional, también denominada three-dimensional printing (3D printing) en la literatura anglosajona, pasó de ser una herramienta de prototipado a un recurso clínico con usos concretos en cirugía. En términos prácticos, convierte información de imagen, habitualmente proveniente de tomografía computarizada, en modelos físicos, guías específicas para el paciente o implantes personalizados. Su atractivo en traumatología de mano y muñeca es evidente: la anatomía es pequeña, la tolerancia al error es baja y la interpretación espacial de múltiples fragmentos no siempre es intuitiva en radiografías o reconstrucciones bidimensionales. Las revisiones generales coinciden en que la tecnología puede mejorar la

visualización anatómica y la preparación operatoria, aunque también añaden advertencias sobre costes, curva de aprendizaje, tiempos de segmentación y heterogeneidad de materiales y procesos (1-4).

La evidencia ortopédica más amplia ha sido consistente en un punto: cuando la impresión tridimensional se aplica a casos complejos, suele reducir variables intraoperatorias intermedias, como tiempo operatorio, sangrado o fluoroscopia. Sin embargo, ese beneficio global no debe extrapolarse sin matices a la cirugía de mano. Las fracturas complejas del radio distal, del escafoides y las maluniones del antebrazo distal presentan exigencias técnicas específicas; una reducción modesta del tiempo quirúrgico puede ser valiosa si evita reposicionamientos, cambios



repetidos de tornillos o trayectorias inadecuadas, pero puede carecer de trascendencia clínica si no se traduce en mejor reducción articular, menor tasa de complicaciones o mejor función del paciente. Las revisiones sistemáticas ortopédicas más recientes apoyan la reducción de métricas intraoperatorias, aunque reconocen que la calidad metodológica sigue siendo irregular y que la magnitud del efecto depende del tipo de intervención tridimensional utilizada (5-10).

La literatura específica de cirugía de mano también obliga a abandonar una visión simplista. No existe una sola "impresión 3D". Bajo esa etiqueta conviven, al menos, tres estrategias distintas: modelos anatómicos impresos para comprender la fractura y ensayar la cirugía; guías de corte o de trayectoria, diseñadas para traducir el plan virtual a la mesa operatoria; e implantes o placas adaptadas al paciente. Cada una modifica un eslabón distinto del acto quirúrgico, por lo que no cabe esperar el mismo efecto sobre planificación, tiempo quirúrgico, fluoroscopia o desenlaces funcionales. Las revisiones de cirugía de mano

publicadas en la última década muestran precisamente eso: un campo prometedor, dominado por fracturas del radio distal y del escafoides, con entusiasmo tecnológico superior a la solidez del diseño clínico en muchos estudios (4,7,8,11,12).

En ese contexto, la pregunta relevante no es si la impresión tridimensional "funciona" de forma abstracta, sino si añade valor real frente a la planificación convencional en fracturas complejas de mano y muñeca. Este manuscrito tuvo como objetivo realizar una revisión crítica narrativa para responder tres cuestiones: si reduce tiempo quirúrgico, si reduce fluoroscopia y si mejora la planificación preoperatoria; además, se discutió quiénes se benefician más, en qué momento conviene implementarla y cómo debería medirse su efecto en estudios antes-después.

2. Metodología

Se realizó una revisión crítica narrativa de la literatura, orientada a la toma de decisiones clínicas más que a la estimación de un efecto combinado. La búsqueda se efectuó

en PubMed/MEDLINE, Embase, Scopus y ScienceDirect/Elsevier entre el 1 de enero de 2016 y el 1 de marzo de 2026. Se emplearon combinaciones de los términos en inglés y español: "3D printing", "three-dimensional printing", "hand surgery", "distal radius fracture", "scaphoid fracture", "malunion", "corrective osteotomy", "patient-specific guide", "patient-specific instrumentation", "preoperative planning", "fluoroscopy" y "wrist surgery". También se revisaron las listas de referencias de artículos de síntesis y estudios comparativos para identificar trabajos adicionales potencialmente relevantes.

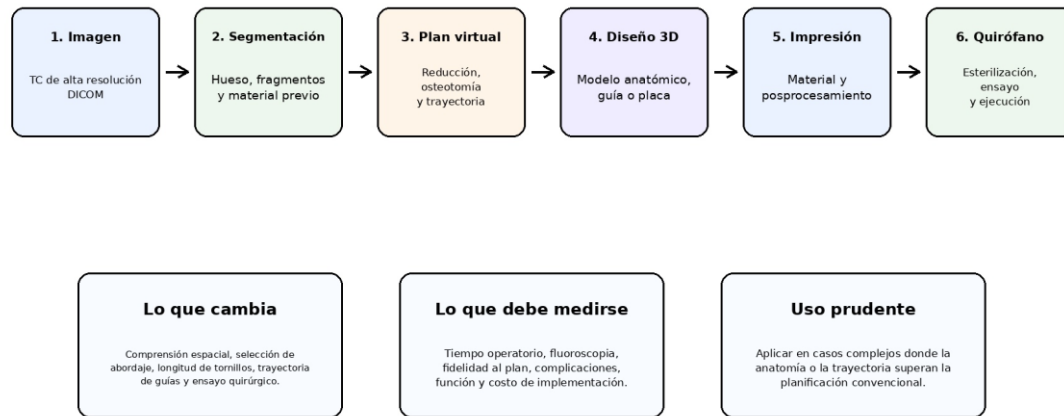
Se incluyeron revisiones sistemáticas, metaanálisis, ensayos clínicos, estudios comparativos, cohortes, series de casos, estudios cadavéricos y artículos técnicos con resultados clínicos o intraoperatorios verificables. Se priorizaron estudios de cirugía de mano y muñeca, incluidos radio distal, escafoides, maluniones del antebrazo distal y procedimientos reconstructivos relacionados. Se excluyeron reportes puramente ingenieriles sin desenlaces quirúrgicos, publicaciones no verificables,

resúmenes de congreso sin texto completo y estudios centrados en otras regiones anatómicas salvo cuando aportaban evidencia de implementación directamente transferible a cirugía de muñeca.

La síntesis fue cualitativa y crítica debido a la heterogeneidad de poblaciones, tipos de intervención tridimensional, comparadores y desenlaces. Los hallazgos se organizaron en cinco dominios: panorama de la evidencia, fracturas agudas del radio distal, maluniones y osteotomías correctivas, cirugía del escafoides e implementación práctica. Se dio mayor peso interpretativo a revisiones sistemáticas y a estudios comparativos, y se emplearon series de casos o trabajos técnicos para matizar preguntas de factibilidad, precisión y selección de pacientes.

Figura 1. Flujo de trabajo de impresión 3D en cirugía de mano. La figura resume la transición desde la tomografía computarizada hasta el uso intraoperatorio del biomodelo, guía o implante. Fuente: elaboración propia.

Figura 1. Flujo de trabajo de impresión 3D en cirugía de mano



Para hacer explícita la aplicabilidad clínica, la revisión reorganizó la evidencia según el producto tridimensional utilizado: modelos anatómicos, guías específicas del paciente, planificación virtual aislada e implantes o placas personalizadas. Esta clasificación evita mezclar intervenciones con mecanismos de acción distintos. Un modelo impreso puede mejorar la comprensión anatómica y favorecer el ensayo de reducción; una guía puede disminuir intentos, fluoroscopia o desviación de trayectoria; y un implante personalizado pretende materializar la planificación en la fijación definitiva. Por tanto, el análisis no se centró solamente en si “la impresión 3D funciona”, sino en qué problema

quirúrgico intenta resolver y qué desenlace debería cambiar.

3. Resultados y discusión

Panorama general de la evidencia

La revisión más reciente centrada específicamente en cirugía de mano identificó que el radio distal fue la región anatómica más estudiada y el escafoides la segunda, con predominio de aplicaciones orientadas a planificación preoperatoria e intraoperatoria más que a reconstrucción protésica o educación del paciente (11). Esa distribución importa porque condiciona qué desenlaces son plausibles: en radio distal interesan sobre todo tiempo operatorio,

necesidad de recontornear implantes, longitud adecuada de tornillos y congruencia articular; en escafoides, el punto decisivo suele ser la trayectoria central de la guía y del tornillo, el número de intentos y la fluoroscopia. Las revisiones generales de cirugía y ortopedia han sido coincidentes en que los principales beneficios medidos de la impresión tridimensional recaen sobre variables intermedias del proceso quirúrgico, no sobre desenlaces funcionales duros a largo plazo (1-3,5-10).

Esta asimetría entre beneficio técnico y beneficio clínico es la primera conclusión crítica. La literatura suele presentar como éxito una reducción de minutos operatorios o de disparos fluoroscópicos, pero esa mejoría no siempre se acompaña de menor dolor, mejor fuerza o mejor función medida con instrumentos validados. En cirugía de mano esto es especialmente relevante porque pequeñas diferencias radiográficas o de posicionamiento pueden o no traducirse en mejor resultado reportado por el paciente. Además, parte de la evidencia mezcla modelos impresos, planificación

virtual y guías específicas del paciente como si fueran intervenciones equivalentes, cuando cada una tiene mecanismos y costes distintos (4,7,8,11,12).

A pesar de ello, sería injusto minimizar el hallazgo más robusto de todo el campo: la impresión tridimensional mejora la comprensión espacial de fracturas complejas. Esa ventaja es difícil de capturar con escalas funcionales, pero puede resultar decisiva en lesiones intraarticulares, maluniones con deformidad multiplanar o trayectorias críticas, como las del escafoides. El reto, por tanto, no es demostrar si la tecnología es "impresionante", sino si cambia decisiones concretas, acorta el acto quirúrgico sin sacrificar precisión, reduce exposición radiológica o evita complicaciones derivadas de una planificación insuficiente. En la Tabla 1 se sintetizan los escenarios clínicos donde el valor añadido parece más plausible.

Tabla 1. Escenarios clínicos donde la impresión 3D puede aportar mayor valor en cirugía de mano y muñeca

Escenario clínico	Herramienta 3D predominante	Beneficio esperado	Evidencia predominante	Comentario crítico
Fractura intraarticular compleja del radio distal	Modelo anatómico impreso, planificación virtual y, en casos seleccionados, guías	Mejor comprensión de fragmentos, preselección de placa y tornillos, reducción modesta de tiempo quirúrgico y fluoroscopia	Revisiones sistemáticas, ensayos y cohortes comparativas	La ventaja técnica no se traduce de forma constante en mejor función del paciente.
Fractura tipo die-punch o hundimiento articular del radio distal	Modelo impreso para simulación y estrategia de reducción	Identificación más precisa del fragmento deprimido y de corredores de reducción	Series clínicas y estudios comparativos pequeños	Útil cuando la tomografía computarizada revela una geometría poco intuitiva para la planificación convencional.
Malunión extraarticular o intraarticular del radio distal	Planificación virtual, guías específicas del paciente y placas adaptadas	Corrección multiplanar más precisa y reproducción del plan de osteotomía	Revisión sistemática, series clínicas y artículos técnicos	Es el escenario donde la lógica clínica de la impresión 3D parece más sólida.
No unión o deformidad compleja del escafoides	Modelos impresos, guías percutáneas y plantillas para injerto	Trayectoria más central del tornillo, menos intentos y menor dependencia de fluoroscopia	Revisión específica, cohortes, series de casos y estudios cadavéricos	La mayor parte de la evidencia es pequeña, pero el objetivo técnico es muy medible.
Cirugía de revisión de muñeca o antebrazo distal	Modelado virtual, modelos impresos e implantes personalizados	Anticipación de abordajes, defectos y limitaciones del implante	Series y experiencia de centros de referencia	Su utilidad es alta en anatomías no estándar, aunque con mayor coste logístico.
Entrenamiento e implementación institucional	Simuladores y biomodelos impresos	Mejor comprensión espacial y entrenamiento reproducible antes del uso clínico	Estudios educativos y de simulación	Favorece la adopción, pero no sustituye la demostración de beneficio en pacientes.

Fuente: elaboración propia a partir de: (4-12), (21-33), (45-50).

Figura 2. Algoritmo de indicación selectiva de impresión 3D en cirugía de mano y muñeca.
Fuente: elaboración propia.

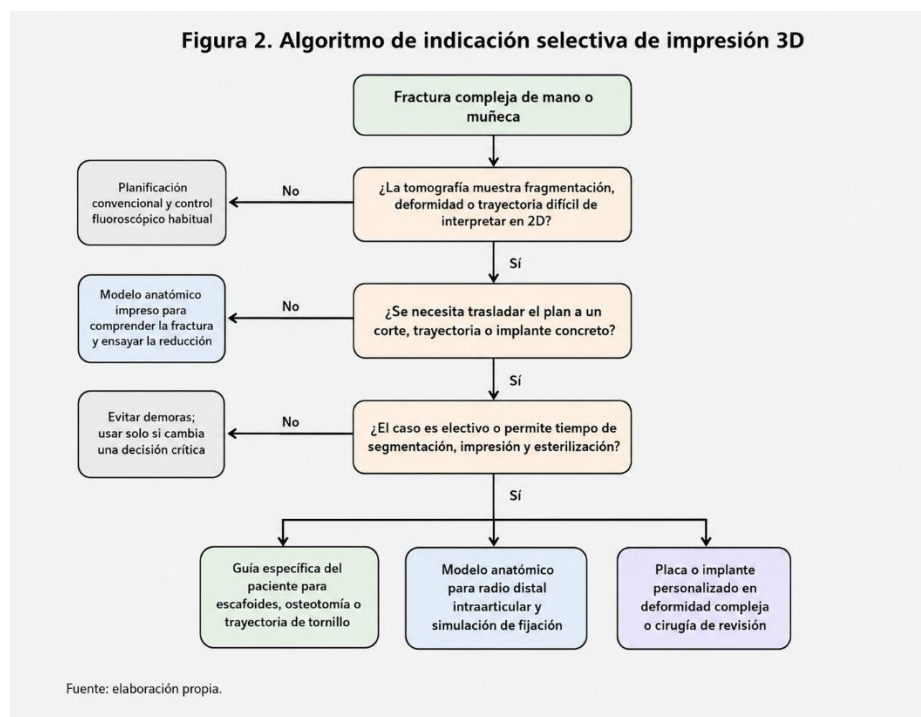


Figura 3. Mapa visual de evidencia por escenario quirúrgico. Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Mapa visual de evidencia por escenario quirúrgico

Escenario	Planificación	Tiempo quirúrgico	Fluoroscopia	Función clínica
Radio distal agudo	Alta	Modesta	Modesta	Incierta
Malunión / osteotomía	Alta	Probable	Probable	Variable
Escafoides	Alta	Moderada	Moderada	Prometedora
Revisión compleja	Alta	No uniforme	No uniforme	No demostrada
Entrenamiento	Alta	No aplica	Menor uso	Indirecta

Tabla 4. Diferencias prácticas entre los principales productos de impresión tridimensional aplicados a cirugía de mano. Fuente: elaboración propia.

Producto tridimensional	Función principal	Desenlace que debería mejorar	Riesgo de sobreuso
Modelo anatómico impreso	Permite visualizar fragmentos, ensayar reducción y discutir abordaje	Comprensión espacial, planificación y comunicación con el equipo	Usarlo en fracturas simples donde la tomografía ya resuelve la incertidumbre
Planificación virtual	Simula reducción, osteotomía, injerto o posición del implante	Precisión del plan, anticipación de dificultades y selección del implante	Quedar como ejercicio digital sin traducción concreta al quirófano
Guía específica del paciente	Traslada al quirófano una trayectoria de tornillo, corte u osteotomía	Fluoroscopia, número de intentos, fidelidad al plan	Retrasar la cirugía o encarecer casos que no necesitan guía
Implante o placa personalizada	Integra la corrección planificada en el dispositivo definitivo	Corrección multiplanar y menor improvisación intraoperatoria	Dependencia logística, costo y dificultad de rescate si cambia el plan

La lectura transversal del panorama general permite una recomendación operativa: la indicación debe comenzar por el problema anatómico, no por la disponibilidad de la impresora. Si la pregunta clínica es “qué abordaje usar” o “cómo entender la geometría de los fragmentos”, el modelo impreso puede ser suficiente. Si la pregunta

es “cómo reproducir exactamente una trayectoria o un plano de osteotomía”, la guía específica del paciente es más lógica. Si la pregunta es “cómo materializar una corrección compleja y sostenerla con un implante”, la planificación virtual con placa personalizada ofrece una solución más completa. Esta jerarquía ayuda a evitar tanto el



entusiasmo indiscriminado como el rechazo injustificado de la tecnología.

¿Reduce tiempo quirúrgico y fluoroscopia en fracturas intraarticulares del radio distal?

El modelo clínico mejor estudiado en trauma agudo de mano y muñeca es la fractura intraarticular del radio distal. Los primeros trabajos contemporáneos mostraron que un modelo físico a escala real permitía ensayar reducción, seleccionar placa y estimar longitudes de tornillos antes de entrar al quirófano, con la expectativa de disminuir improvisación intraoperatoria (13). Posteriormente, series y estudios comparativos extendieron esa lógica a fracturas con impacto del semilunar y patrones tipo die-punch, donde la visualización del fragmento hundido y de los corredores de reducción es especialmente compleja (14-16).

La revisión sistemática más específica sobre este tema, que incluyó 718 pacientes con fracturas intraarticulares del radio distal, aportó la síntesis cuantitativa más útil para la práctica. Frente a la planificación convencional

bidimensional, la cirugía asistida por herramientas tridimensionales redujo de forma modesta el tiempo operatorio -una diferencia ponderada aproximada de 6 minutos- y disminuyó la frecuencia de fluoroscopia en alrededor de 1,1 imágenes por procedimiento. Sin embargo, no mostró ventajas consistentes en el Patient-Rated Wrist Evaluation (PRWE), en la escala visual análoga (visual analogue scale, VAS) del dolor ni en el arco de movilidad (range of motion, ROM); la señal más favorable fue una menor tasa de complicaciones y una mejor adecuación de la longitud de los tornillos (12).

Ese patrón fue compatible con los ensayos clínicos disponibles, pero no uniforme. En el estudio aleatorizado de Chen y colaboradores, el uso de modelos impresos redujo tiempo quirúrgico, pérdida sanguínea y fluoroscopia, aunque la superioridad funcional posterior fue menos convincente (15). Xu y colaboradores comunicaron que la planificación virtual asociada a impresión tridimensional facilitó reducción anatómica y fijación más precisa en

fracturas intraarticulares, lo cual sugiere que el beneficio puede ser mayor cuando el plan no se limita a "mirar mejor", sino que incorpora una simulación concreta del montaje (16).

No obstante, la evidencia negativa o neutra es importante para evitar una lectura triunfalista. Langerhuizen y colaboradores evaluaron si los modelos tridimensionales manuales mejoraban la fiabilidad del cirujano para reconocer características de fracturas intraarticulares del radio distal y no encontraron una mejora clara. Ese hallazgo sugiere que la mera disponibilidad de un modelo físico no garantiza una mejor clasificación ni una mejor decisión si no está integrada en un proceso sistemático de planificación (17). Del mismo modo, el ensayo prospectivo aleatorizado de Grinčuk y colaboradores encontró menos complicaciones mayores en el grupo planificado con modelos impresos, pero no una ventaja radiológica o funcional contundente a corto plazo (18).

La prueba más sobria llegó con el ensayo clínico aleatorizado de Sebastián Giraldo y colaboradores. En pacientes operados con placa

volar por fracturas intraarticulares del radio distal, añadir modelo impreso y simulación preoperatoria no mejoró de forma estadísticamente significativa el tiempo quirúrgico, la radioscopia, el PRWE ni la pérdida de material de osteosíntesis. El trabajo es clínicamente valioso porque demuestra que no toda fractura intraarticular se beneficia de la misma manera y que, en manos experimentadas y con un flujo convencional maduro, la ganancia incremental puede ser nula (19).

Cuando la tecnología se traslada desde el modelo impreso hacia la instrumentación específica para el paciente, la promesa cambia. Casari y colaboradores describieron una serie prospectiva en la que la planificación asistida por computadora y la instrumentación específica del paciente lograron reducción precisa y restauración funcional razonable en fracturas intraarticulares del radio distal, pero concluyeron también que el esfuerzo adicional del proceso no superó de forma evidente sus beneficios para uso rutinario (20). Esta observación es esencial: una estrategia puede ser técnicamente brillante y al mismo tiempo poco eficiente si requiere



demasiados pasos, impresión lenta o dependencia de un equipo muy especializado.

En conjunto, el mensaje para el radio distal agudo es matizado. Sí existe una señal relativamente consistente de reducción de tiempo quirúrgico y fluoroscopia, sobre todo cuando el patrón es complejo y la planificación tridimensional se usa para algo más que "visualizar". Pero el tamaño del

efecto es modesto, la superioridad funcional es incierta y los estudios negativos muestran que la tecnología no compensa por sí sola una mala indicación. El mayor valor parece concentrarse en fracturas muy conminutas, con depresión articular, fragmentos marginales difíciles o necesidad de prever implantes y tornillos antes del acto quirúrgico (12,14-20).

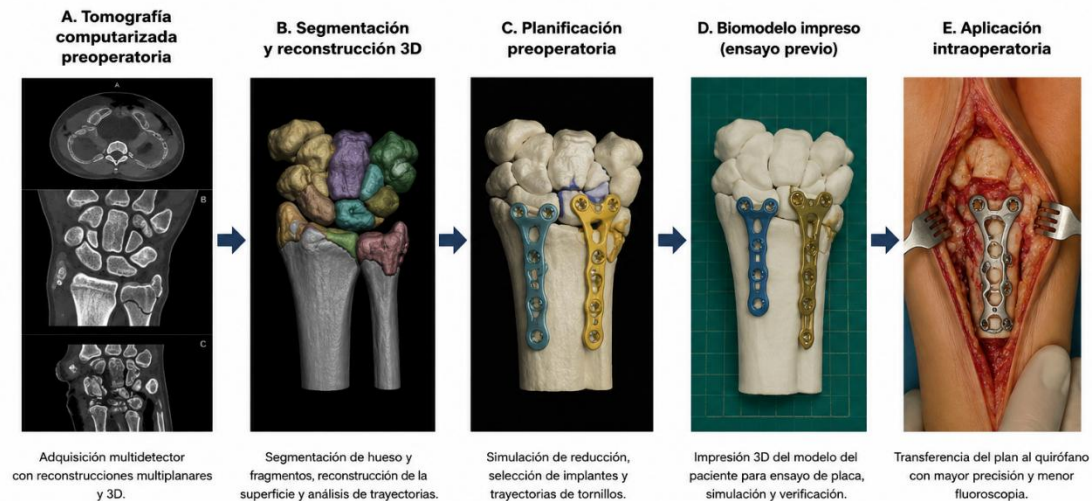
Tabla 2. Estudios comparativos o clínicamente relevantes sobre tiempo quirúrgico, fluoroscopia y planificación

Autor, año	Diseño	Muestra / lesión	Intervención 3D	Hallazgos relevantes
Chen, 2019 (15)	Ensayo clínico aleatorizado	Fracturas del radio distal	Modelo impreso para planificación preoperatoria	Menor tiempo quirúrgico, menor sangrado y menos fluoroscopia; sin superioridad funcional claramente sostenida.
Roelofs, 2024 (12)	Revisión sistemática	12 estudios; 718 pacientes con radio distal intraarticular	Modelos, planificación virtual y guías	Reducción aproximada de 6 min de tiempo operatorio y de 1,1 imágenes fluoroscópicas; sin mejoría consistente en PRWE, VAS o ROM.
Grinčuk, 2023 (18)	Estudio prospectivo aleatorizado	Fracturas complejas del radio distal	Planificación con modelo impreso	Menos complicaciones mayores; sin ventaja radiológica o funcional contundente a corto plazo.
Sebastián Giraldo, 2025 (19)	Ensayo clínico aleatorizado	30 fracturas intraarticulares del radio distal	Modelo impreso y simulación preoperatoria	No mostró diferencias significativas en tiempo quirúrgico, radioscopía, PRWE o pérdida de material.
Casari, 2021 (20)	Serie prospectiva	7 fracturas intraarticulares del radio distal	Instrumentación específica del paciente	Reducción precisa y factibilidad demostrada, pero con esfuerzo adicional importante.
Langerhuizen, 2020 (17)	Estudio experimental de fiabilidad	Cirujanos evaluando fracturas del radio distal	Modelo tridimensional manual	No mejoró de forma clara la fiabilidad para reconocer características de la fractura.
Marcano-Fernández, 2021 (39)	Estudio comparativo	20 fijaciones percutáneas de escafoides	Guía personalizada versus técnica libre	Reducción del 43% del tiempo quirúrgico y del 52% del tiempo de fluoroscopia con precisión final comparable.
Rong, 2024 (43)	Serie clínica	10 fracturas de cintura del escafoides con diagnóstico tardío	Guía impresa específica del paciente	Inserción exitosa en un intento y consolidación completa en seguimiento corto.
Dong, 2025 (49)	Retrospectivo comparativo	Osteotomía de acortamiento cubital	Placa guía impresa	Redujo tiempo operatorio y fluoroscopia y mejoró la recuperación funcional temprana; evidencia translacional para cirugía de muñeca.

Fuente: elaboración propia a partir de: (12), (15), (17-20), (39), (43), (49).

Figura 4. De la tomografía computarizada al biomodelo quirúrgico. Esquema ilustrativo de segmentación, planificación e impresión para una fractura compleja de radio distal. Fuente: elaboración propia

Figura 4. De la tomografía computarizada al biomodelo quirúrgico



La imagen no termina en el diagnóstico: se transforma en información accionable que guía la decisión y la técnica quirúrgica.

Fuente: elaboración propia.

¿Mejora la planificación en maluniones y osteotomías correctivas del radio distal y antebrazo distal?

Si el trauma agudo del radio distal es el escenario mejor estudiado, las maluniones y osteotomías correctivas representan probablemente el campo donde la lógica de la impresión tridimensional es más sólida. En estas situaciones el objetivo no es solo fijar fragmentos, sino reconstruir una anatomía perdida en varios planos, con correlatos directos sobre dolor, prensión, movilidad y congruencia

articular. La revisión sistemática con metaanálisis de de Muinck Keizer y colaboradores mostró que la planificación virtual y la asistencia tridimensional en osteotomías correctivas del radio distal mal consolidado lograron correcciones radiográficas precisas y mejoras funcionales, aunque con evidencia global de bajo nivel y con predominio de series pequeñas (21).

Los trabajos técnicos y series clínicas publicados después reforzaron esa impresión. Honigmann y colaboradores propusieron una guía impresa sencilla para osteotomía palmar en



cuña de apertura, destacando que la guía facilitó la reconstrucción anatómica y acortó pasos intraoperatorios complejos (22). Inge y colaboradores demostraron que incluso con un flujo de trabajo de bajo costo era posible planificar osteotomías del radio distal mal consolidado, lo que sugiere que la barrera económica puede ser relativa si el centro domina segmentación y prototipado básico (23). Roner y colaboradores, mediante una técnica de rampa específica del paciente, mostraron que la precisión de las osteotomías de apertura podía mejorar cuando la guía se diseñaba para controlar explícitamente el plano y la magnitud de la corrección (24).

La cirugía correctiva intraarticular es aún más exigente. Oka y colaboradores aplicaron simulación tridimensional y un instrumento específico para el paciente en maluniones intraarticulares del radio distal y documentaron reducción importante del escalón articular, mejoría del dolor y del PRWE, con aumento de fuerza de prensión. Aunque el estudio fue pequeño, reforzó la idea de que el beneficio tridimensional crece cuando la tarea

quirúrgica exige reproducir con precisión una geometría individual difícil de traducir a referencias anatómicas estándar (25). En la misma línea, Belloti y colaboradores presentaron una serie clínica y posteriormente una descripción técnica donde el prototipado ayudó a decidir el nivel de osteotomía, la superficie articular a restaurar y el implante más apropiado, con resultados funcionales aceptables y mejor comprensión de la deformidad por parte del cirujano (26,27).

La evolución más ambiciosa de esta estrategia ha sido el paso desde guías hacia placas adaptadas al paciente. Schindele y colaboradores comunicaron resultados favorables con placas planificadas e impresas a medida para osteotomías correctivas del radio distal y del antebrazo, con mejoría sustancial del PRWE y de los arcos de movilidad al año. Más que un "extra tecnológico", estos implantes funcionaron como una forma de materializar la planificación virtual en un montaje definitivo que obliga menos improvisación intraoperatoria (28). Esa lógica ya había sido anticipada por Murase, quien describió la osteotomía correctiva del radio distal mal

consolidado usando instrumento específico para el paciente como una técnica destinada a posicionar orificios de tornillos y plano de osteotomía con alta reproducibilidad (29).

En revisión de muñeca y deformidad postraumática compleja, la literatura es menos numerosa pero conceptualmente muy instructiva. Osagie y colaboradores mostraron el valor del modelado tridimensional para la planificación preoperatoria de cirugía de revisión de muñeca (30). Horas y colaboradores ampliaron la discusión a cirugía de revisión traumática compleja en ortopedia, subrayando que los principales beneficios no son solo métricos, sino cognitivos: escoger el abordaje, anticipar dificultades, decidir implantes y ensayar la reconstrucción antes de la exposición real (31). Tetsworth y colaboradores llevaron esta idea al extremo de las deformidades

postraumáticas severas y defectos óseos complejos, donde la reconstrucción anatómica prácticamente exige una réplica virtual previa del problema a corregir (32).

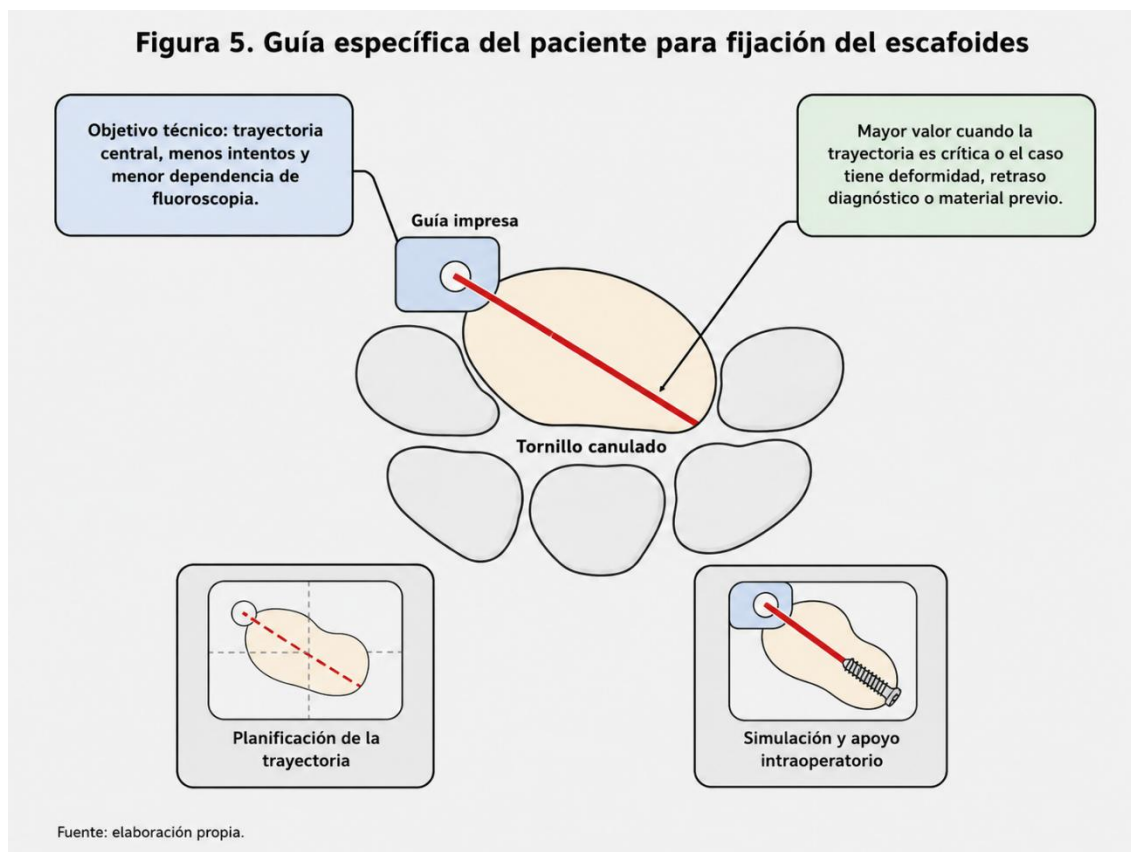
El análisis crítico de este bloque es claro. La impresión tridimensional parece aportar más valor cuando la cirugía busca corregir una deformidad individual, multiplanar y no intuitiva. En ese contexto, la planificación no es un lujo, sino el corazón del tratamiento. La limitación es que ese beneficio se paga con tiempo preoperatorio, necesidad de tomografía computarizada de alta calidad, software, personal entrenado y, en algunos casos, logística industrial para esterilización o fabricación de implantes. Por ello, estas herramientas son más fáciles de justificar en cirugía electiva compleja que en trauma agudo simple (21-32).

Tabla 5. Indicaciones fuertes y débiles para impresión 3D en cirugía de mano y muñeca.
Fuente: elaboración propia.

Escenario	Candidato fuerte a 3D	Candidato débil a 3D	Justificación
Radio distal agudo	Fractura intraarticular con múltiples fragmentos, depresión articular o duda sobre placa/tornillos	Fractura extraarticular simple con reducción predecible	El beneficio crece cuando el modelo cambia abordaje o estrategia de fijación
Malunión del radio distal	Deformidad multiplanar, pérdida de referencias anatómicas o necesidad de corrección simétrica al lado sano	Deformidad leve con osteotomía estándar y referencias claras	La planificación virtual reproduce el plano de corrección con mayor fidelidad

Escafoides	Trayectoria crítica, diagnóstico tardío, no unión, deformidad en joroba o material previo	Fractura no desplazada simple en manos expertas	La guía se justifica cuando reduce intentos y fluoroscopia
Cirugía de revisión	Anatomía no estándar, defectos óseos, implantes previos o necesidad de injerto modelado	Procedimiento de retiro simple de material	El modelo anticipa obstáculos y evita improvisación
Entrenamiento	Programas que necesitan simulación reproducible de reducción y fijación	Uso aislado sin integración curricular	El valor educativo requiere objetivos y evaluación definidos

Figura 5. Guía específica del paciente para fijación del escafoides. El objetivo técnico es mejorar centralidad del tornillo, reducir intentos y disminuir dependencia de fluoroscopia. Fuente: elaboración propia.



En la práctica, la decisión de imprimir no debe tomarse después de revisar únicamente la radiografía inicial. La tomografía computarizada permite reconocer si la lesión tiene realmente un componente tridimensional no intuitivo: depresión articular, rotación de fragmentos, pérdida de la referencia cortical, colisión potencial

entre tornillos o deformidad en planos combinados. Cuando esos hallazgos están ausentes, la impresión puede añadir vistosidad pero poco valor real. Cuando están presentes, el modelo o la guía se convierten en una extensión razonable de la imagen diagnóstica.

Escafoides: precisión de la trayectoria, menos intentos y menor dependencia de fluoroscopia

El escafoides constituye un escenario casi ideal para evaluar el valor técnico de la impresión tridimensional. A diferencia de otras fracturas, el desenlace intraoperatorio crítico suele concentrarse en una maniobra muy específica: colocar una guía o un tornillo por la trayectoria más central posible, evitando penetraciones corticales, múltiples intentos y exposición innecesaria a fluoroscopia. La revisión de Li y colaboradores sintetizó precisamente ese punto y concluyó que los modelos y guías específicas del paciente pueden mejorar la precisión, acortar el procedimiento y reducir la exposición radiológica en cirugía del escafoides (33).

En reconstrucciones complejas del polo proximal y no uniones, los beneficios descritos han sido sobre todo de planificación anatómica. Houdek y colaboradores mostraron cómo la modelización tridimensional facilitó el diseño del injerto vascularizado osteoarticular de cóndilo femoral medial para

reemplazar el polo proximal del escafoides, una aplicación de alto valor en casos donde la morfología residual y la congruencia articular son difíciles de estimar intraoperatoriamente (34). Jew y colaboradores presentaron el uso de impresión tridimensional en fracturas complejas del escafoides como apoyo para comprender mejor la orientación de los fragmentos y planear la fijación (35).

La literatura sobre guías percutáneas específicas para el paciente es más directamente accionable. En estudios cadavéricos, Guo y colaboradores demostraron que una plantilla individualizada ayudaba a la colocación más precisa del tornillo o de la aguja guía (36). Salabi y colaboradores, también en modelo cadavérico, confirmaron la factibilidad de una guía impresa para fijación percutánea de fracturas no desplazadas, reforzando la hipótesis de que la utilidad de la tecnología es mayor cuando el objetivo técnico es muy delimitado (37). DeWolf y colaboradores describieron un dispositivo impreso dirigido a la fijación del escafoides, con énfasis



en la reproducibilidad del trayecto (38).

Los estudios clínicos comparativos aportan señales incluso más fuertes que las observadas en radio distal. Marcano-Fernández y colaboradores compararon una guía percutánea personalizada con la técnica libre y encontraron una reducción del 43% en el tiempo quirúrgico y del 52% en el tiempo de fluoroscopia, sin sacrificar precisión final de la posición del tornillo (39). Rong y colaboradores describieron una serie clínica de fijación percutánea guiada por modelo impreso con consolidación completa y trayectoria central factible, confirmando que la técnica es viable en pacientes reales y no solo en laboratorio (40).

En fracturas tardíamente diagnosticadas o presentadas con demora, la misma línea de trabajo mostró que las guías impresas podían lograr inserción en un solo intento, consolidación rápida y buena recuperación funcional en fracturas mínimamente desplazadas de la cintura del escafoides (43). Peeters y colaboradores utilizaron tecnología tridimensional para corregir la deformidad en joroba de una no

unión del escafoides (41), y Oki y colaboradores la aplicaron a una no unión con tornillos previos, un contexto donde la planificación preoperatoria es particularmente valiosa para evitar trayectorias inviables o colisiones con material antiguo (42). Más recientemente, un estudio cadavérico del abordaje dorsal con guía específica mostró resultados aceptables y menos intentos frente a la técnica libre, aunque con muestra pequeña y sin diferencias estadísticamente concluyentes en todos los parámetros (44).

El mensaje crítico en escafoides es más favorable que en radio distal. La razón no es que la evidencia sea mucho más robusta, sino que el objetivo quirúrgico es más concentrado y medible: trayectoria, centralidad, número de intentos, tiempo y fluoroscopia. Cuando la intervención tridimensional se diseña para resolver una tarea concreta y repetible, el efecto es más visible. Aun así, persisten dos objeciones. La primera es que muchos estudios tienen muestras muy pequeñas. La segunda es que parte de la ventaja observada podría atenuarse en manos de cirujanos con gran

experiencia en técnica libre y fluoroscopia convencional (33-44).

Tabla 6. Riesgos de implementación de impresión 3D y estrategias de mitigación institucional.
Fuente: elaboración propia

Riesgo de implementación	Consecuencia posible	Medida de mitigación	Indicador de seguimiento
Segmentación lenta	Retraso de cirugía o pérdida de oportunidad en trauma agudo	Protocolos de TC, plantillas de segmentación y responsables definidos	Tiempo desde indicación hasta modelo disponible
Modelo que no cambia conducta	Costo adicional sin beneficio clínico	Criterios de indicación y revisión por cirujano responsable	Porcentaje de casos en que modificó abordaje, implante o trayectoria
Errores de diseño o escala	Guía inservible o plan no reproducible	Verificación de dimensiones, lado, escala y ajuste sobre biomodelo	Tasa de reimpresión o descarte intraoperatorio
Problemas de esterilización	Imposibilidad de uso en quirófano	Material compatible y circuito institucional validado	Eventos de no disponibilidad por esterilización
Sesgo de entusiasmo tecnológico	Sobreindicación en fracturas simples	Auditoría antes-después con desenlaces clínicos y costos	Costo por minuto de fluoroscopia o complicación evitada

La implementación responsable requiere un circuito institucional mínimo: protocolo de adquisición de imágenes, segmentación validada, aprobación del cirujano, impresión con control de calidad, esterilización cuando corresponda y registro prospectivo de resultados. Sin ese circuito, el modelo puede convertirse en un objeto atractivo pero poco útil. Con un circuito bien definido, en cambio, el valor de la tecnología puede medirse y refinarse caso por caso, evitando que el entusiasmo sustituya a la evaluación clínica.

Implementación, entrenamiento y factibilidad real

La adopción de impresión tridimensional en cirugía de mano

depende tanto de la logística como de la ciencia. La literatura sobre entrenamiento ilustra bien este punto. Brichacek y colaboradores desarrollaron un simulador impreso para colocación de agujas de Kirschner en fracturas de la mano (45). Prsic y colaboradores mostraron que un modelo impreso permitía practicar fijación de fracturas en el hogar sin depender de fluoroscopia, lo que resulta útil para adquirir memoria espacial y técnica antes del contacto con pacientes (46). Papavasiliou y colaboradores propusieron un marco de entrenamiento estandarizado usando modelos biomiméticos ex vivo impresos, mientras que Raeker-Jordan y colaboradores describieron



fantasmas personalizables para reemplazar modelos cadavéricos en formación quirúrgica de miembro superior (47,48).

Estos estudios no prueban por sí mismos una superioridad clínica, pero sí muestran algo importante: la tecnología puede reducir la distancia entre planificación y ejecución, y puede hacer más reproducible el aprendizaje de técnicas complejas. Ello podría ser especialmente relevante en centros de menor volumen, en servicios en fase de implementación o cuando se pretende extender el uso de guías específicas del paciente sin depender exclusivamente de unos pocos cirujanos expertos. Sin embargo, la traducción de estas ventajas educativas a mejores resultados clínicos todavía es

inferencial y no demostrada de forma sólida (45-48).

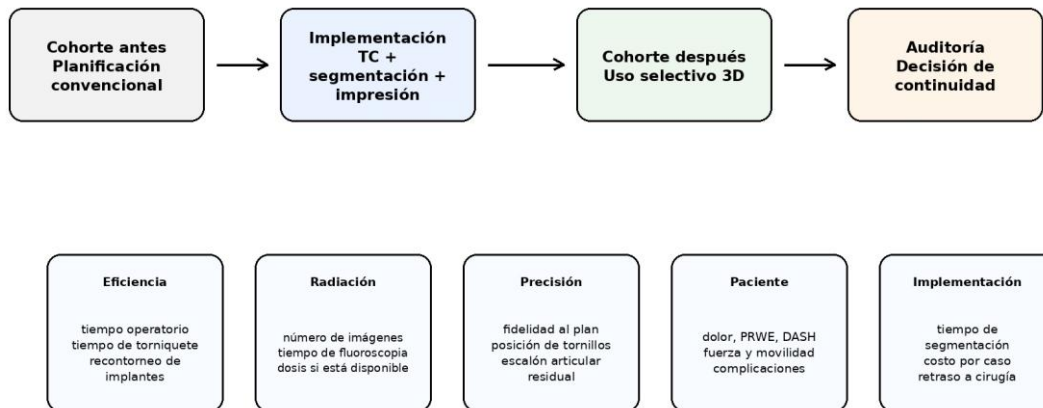
La factibilidad real también depende del tiempo. En cirugía de muñeca y antebrazo distal, la experiencia contemporánea sugiere que las estrategias más exitosas son aquellas donde la impresión tridimensional se integra en un flujo de trabajo claro: indicación de tomografía computarizada, segmentación rápida, validación del plan, impresión y esterilización sin retrasar indebidamente la cirugía. Cuando el proceso añade demora, costes desproporcionados o complejidad que no cambia la conducta, la balanza se inclina en contra. Por eso la adopción es más intuitiva en osteotomías correctivas electivas que en fracturas simples de resolución urgente (11,12,20,21,28,30-32).

Tabla 7. Preguntas y diseños sugeridos para evaluar impresión 3D en cirugía de mano. Fuente: elaboración propia.

Pregunta clínica	Diseño recomendado	Desenlace primario razonable	Desenlaces secundarios
¿Reduce fluoroscopia en escafoides?	Antes-después o comparativo con guía versus técnica libre	Tiempo o número de imágenes fluoroscópicas	Número de intentos, centralidad del tornillo, consolidación, complicaciones
¿Reduce tiempo en radio distal complejo?	Cohorte prospectiva por patrón de fractura	Tiempo piel a piel o torniquete	Longitud de tornillos, escalón articular, reoperación, PRWE
¿Mejora corrección de malunión?	Serie prospectiva con planificación virtual y comparación con lado sano	Desviación entre corrección planificada y obtenida	DASH, PRWE, fuerza, movilidad, consolidación, costo
¿Es sostenible institucionalmente?	Auditoría de implementación	Tiempo total de flujo y costo por caso	Retraso a cirugía, reimpresiones, descartes, satisfacción del equipo

Figura 6. Evaluación antes-después para adopción institucional de impresión 3D. Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Evaluación antes-después para adopción institucional



Una forma más rigurosa de evaluar la tecnología es abandonar la pregunta general “¿sirve la impresión 3D?” y formular preguntas por escenario. En escafoides, por ejemplo, el resultado más lógico no es el Patient-Rated Wrist Evaluation, sino la centralidad del tornillo, los intentos de guía y la fluoroscopia. En malunión, la pregunta no es si el modelo “se ve bien”, sino si la corrección obtenida reproduce la corrección planificada. En radio distal agudo, el valor puede medirse por reducción de improvisación, longitud correcta de tornillos y menor necesidad de revisar repetidamente el montaje con fluoroscopia.

Discusión

La evidencia revisada permite una conclusión central y deliberadamente poco espectacular: la impresión tridimensional en cirugía de mano no debe entenderse como una tecnología uniformemente superior, sino como un conjunto de herramientas que puede añadir valor en problemas anatómicos específicos. Esta distinción es decisiva. Un modelo físico impreso tiene como principal función mejorar la representación mental del problema y facilitar la toma de decisiones preoperatorias; una guía específica del paciente intenta trasladar un plan a un gesto intraoperatorio concreto; una placa personalizada busca convertir la



planificación en una solución definitiva. Pedirles a todas que mejoren por igual tiempo quirúrgico, fluoroscopia y función del paciente es metodológicamente incorrecto y explica parte de la heterogeneidad observada en la literatura (7,11,12,21,28,33).

Desde una perspectiva estrictamente pragmática, el desenlace que parece responder mejor a estas tecnologías es la eficiencia técnica intraoperatoria. Las revisiones ortopédicas de amplio espectro han mostrado reducciones de tiempo operatorio y de fluoroscopia en distintos contextos traumáticos (5,6,9). En mano y muñeca, el efecto absoluto es más modesto pero sigue una lógica plausible: cuanto más complejo es el problema anatómico y cuanto más concreta es la traducción del plan al acto quirúrgico, mayor es la probabilidad de observar una reducción medible del tiempo operatorio. Por eso las series de radio distal muestran beneficios discretos y variables, mientras que en escafoides las guías personalizadas llegan a reducciones relativas más notables de tiempo y

fluoroscopia (12,15,19,33,39,40,43,44).

La pregunta sobre fluoroscopia merece un comentario particular. En la literatura de impresión tridimensional, el término se usa a veces de forma laxa: algunos estudios reportan número de imágenes, otros tiempo de radioscopia y muy pocos incluyen dosis-área producto o kerma en aire. Esa falta de estandarización dificulta comparar series y limita la posibilidad de síntesis cuantitativa robusta. Aun así, el sentido clínico del desenlace es incuestionable. En procedimientos como la fijación del escafoides o la osteosíntesis del radio distal, el valor de reducir fluoroscopia no reside solo en ganar segundos, sino en disminuir repeticiones de trayectorias, verificar menos veces un montaje y reducir exposición acumulada para paciente y equipo. El reciente auditaje de la fijación del radio distal mostró que incluso una cirugía convencional madura puede implicar decenas de exposiciones y tiempos de radioscopia nada triviales, lo que vuelve clínicamente relevante cualquier estrategia que reduzca esa

dependencia sin comprometer precisión (50).

Sin embargo, la reducción de fluoroscopia no debe confundirse con mejor cirugía per se. Un procedimiento puede usar menos imágenes porque el cirujano acepta un margen mayor de incertidumbre, y no porque la planificación sea mejor. Por eso resulta imprescindible que los estudios antes-después combinen métricas de radiación con variables de fidelidad al plan: longitud y posición final del tornillo, desviación del trayecto respecto al objetivo, escalón articular residual, necesidad de cambiar implantes durante el acto quirúrgico o número de intentos de inserción de la guía. Cuando estos desenlaces se analizan juntos, la impresión tridimensional adquiere un sentido más claro: no sustituye el juicio del cirujano, pero puede disminuir la fricción entre plan y ejecución (12,20,25,33,39,43,44).

La segunda gran pregunta es si mejora la planificación. Aquí la respuesta es más afirmativa, aunque con una advertencia semántica importante: planificar mejor no siempre significa operar mejor de forma demostrable. Los modelos

físicos, la simulación virtual y las guías específicas del paciente hacen visible la anatomía y permiten ensayar maniobras con antelación. En maluniones del radio distal y deformidades postraumáticas complejas, donde la corrección multiplanar es difícil de construir mentalmente, esa ventaja es probablemente el principal argumento a favor de la tecnología (21-32). No obstante, la mejor prueba de la distancia entre comprensión y resultado es el estudio de Langerhuizen y colaboradores, donde la presencia de modelos impresos no mejoró de forma relevante la fiabilidad del cirujano para reconocer características de la fractura. En otras palabras, no basta con imprimir un objeto; hay que integrarlo en un proceso de planificación que realmente modifique la decisión o la táctica operatoria (17).

La selección del paciente emerge, por tanto, como la verdadera clave. La literatura revisada sugiere que los mejores candidatos son cuatro grupos. Primero, fracturas intraarticulares complejas del radio distal, sobre todo con depresión del semilunar, fragmentos marginales



pequeños o duda razonable sobre la estrategia de reducción y fijación. Segundo, maluniones sintomáticas del radio distal o del antebrazo distal que requieran osteotomía correctiva y donde la deformidad sea claramente multiplanar. Tercero, fracturas o no uniones del escafoides en las que la centralidad del tornillo sea crítica o el trayecto esté condicionado por deformidad, abordaje dorsal, retraso diagnóstico o material previo. Cuarto, cirugía de revisión o reconstrucción individualizada de muñeca, donde la anatomía disponible deja de parecerse al "caso estándar" para el cual se diseñaron los implantes convencionales (12,21-33,39-44).

El grupo que probablemente menos se beneficia incluye fracturas relativamente simples, bien entendidas con radiografías y tomografía computarizada, tratadas por equipos habituados a esos patrones y donde la impresión tridimensional no cambia ni el abordaje ni el implante. El ensayo aleatorizado más reciente en radio distal sirve precisamente como antídoto frente a la sobreindicación: cuando la planificación convencional ya resuelve con solvencia la mayor

parte de la incertidumbre, la ganancia incremental del modelo impreso puede ser insignificante (19). De manera similar, en escafoides no todas las fracturas exigen una guía personalizada; en manos expertas, los casos simples y no desplazados pueden resolverse con técnica libre y fluoroscopia con resultados excelentes, y el costo de diseñar una guía puede superar el beneficio esperado (33,39,44).

El momento de intervención también importa. En cirugía electiva correctiva, la impresión tridimensional dispone del tiempo necesario para desplegar sus ventajas: segmentación cuidadosa, comparación con el lado contralateral, simulación, impresión, esterilización y discusión del plan. En trauma agudo, por el contrario, el calendario es más estrecho. Una demora para imprimir puede ser aceptable si evita errores costosos en una fractura intraarticular difícil, pero sería injustificable si retrasa un procedimiento sencillo o si el modelo no va a cambiar la conducta. Esta consideración logística explica por qué la osteotomía correctiva parece un terreno más natural para la adopción sistemática que el radio

distal agudo de baja complejidad (12,19-21,28-32).

Otro aspecto subestimado es el coste de oportunidad. Cada caso planificado con impresión tridimensional consume tiempo de cirujanos, radiólogos o ingenieros clínicos, recursos de segmentación, material de impresión y, en ocasiones, coordinación industrial. El campo ha tendido a reportar el costo directo del modelo, pero mucho menos el costo del flujo completo y de la infraestructura. Ese vacío es relevante porque una herramienta puede ser útil clínicamente y, aun así, no ser coste-efectiva si su aplicación es indiscriminada. Las revisiones recientes insisten en esa necesidad de madurez metodológica: se debe pasar de reportar "casos exitosos" a estudiar condiciones de implementación, tiempos de respuesta, aprendizaje del equipo y costo por complicación evitada (7,11,12,31,32).

La literatura educativa aporta una dimensión complementaria. Los simuladores y modelos de entrenamiento no prueban resultados en pacientes, pero sí pueden reducir la barrera de entrada

para adoptar técnicas complejas, especialmente en programas de residencia y en centros con menor volumen (45-48). En el largo plazo, ese componente formativo podría ser una de las contribuciones más relevantes de la impresión tridimensional: no tanto reemplazar la experiencia, sino acelerar la comprensión geométrica y disminuir la improvisación. Aun así, mientras esa hipótesis no se relacione con resultados clínicos reales, debe considerarse promesa razonable y no evidencia definitiva.

Desde el punto de vista metodológico, los trabajos disponibles comparten debilidades repetidas. Predominan series pequeñas, monocéntricas, con riesgo de sesgo de selección y sin ajuste suficiente por complejidad de la fractura. Muchas comparaciones usan controles históricos, de modo que es difícil separar el efecto de la tecnología del efecto de la curva de aprendizaje del equipo. Los desenlaces son heterogéneos: algunos estudios reportan minutos de cirugía, otros tiempo total de anestesia, otros número de imágenes fluoroscópicas y otros tiempo de radioscopia; además, los



resultados funcionales se evalúan con escalas y tiempos de seguimiento muy diversos. Finalmente, existe un sesgo de publicación probable, porque los casos donde la tecnología no añadió valor tienen menos probabilidad de convertirse en artículo (4-12,21,33).

Estas limitaciones no invalidan la evidencia, pero obligan a diseñar mejor los próximos estudios. Para responder con mayor rigor a la pregunta clínica del presente manuscrito, los diseños antes-después deberían incorporar al menos tres grupos de desenlaces. El primero, técnico: tiempo de cirugía, número de imágenes fluoroscópicas, tiempo de radioscopia y fidelidad entre plan y resultado. El segundo, clínico: dolor, funcionalidad reportada por el paciente, fuerza, movilidad, consolidación y complicaciones. El tercero, de implementación: tiempo desde la indicación hasta la disponibilidad del

modelo o guía, costo total del proceso, necesidad de repetir la impresión, descarte intraoperatorio de tornillos o placas y satisfacción del cirujano con la utilidad real del dispositivo. Sin esta última capa, la evaluación de la tecnología seguirá incompleta.

La Tabla 8 propone precisamente un marco operativo para estudios antes-después de adopción institucional. En nuestra interpretación, el desenlace primario más razonable debería variar según el escenario: en escafoides, fluoroscopia e intentos de inserción; en radio distal intraarticular, tiempo quirúrgico y precisión de reducción o de selección de tornillos; en osteotomía correctiva, fidelidad entre deformidad planificada y corrección lograda. Las escalas funcionales deben mantenerse, pero no deberían ser el único punto final primario cuando el mecanismo de beneficio esperado es técnico y no biológico.

Tabla 8. Variables sugeridas para evaluar la adopción de impresión 3D en estudios antes-después

Dominio	Qué medir	Indicador sugerido	Momento de medición	Utilidad práctica
Eficiencia intraoperatoria	Duración del procedimiento	Tiempo piel a piel o tiempo de torniquete	Intraoperatorio	Permite detectar si la planificación tridimensional reduce improvisación y cambios de estrategia.
Radiación	Exposición a fluoroscopia	Número de imágenes, tiempo de radioscopia y, si	Intraoperatorio	Cuantifica un beneficio técnico relevante para paciente y equipo.

		es posible, dosis-área producto y kerma en aire		
Fidelidad al plan	Correspondencia entre plan y resultado	Longitud y trayectoria final de tornillos, escalón o brecha residual, número de intentos de inserción, necesidad de recontornear implantes	Posoperatorio inmediato	Distingue si el beneficio proviene de mejor visualización o de una guía realmente útil.
Resultados clínicos	Función, dolor y recuperación	PRWE, Disabilities of the Arm, Shoulder and Hand, VAS, fuerza de prensión, arco de movilidad, consolidación	6 semanas, 3 meses, 6 meses y 12 meses	Permite saber si la ventaja técnica se traduce en beneficio percibido por el paciente.
Seguridad	Complicaciones y reintervenciones	Malposición de tornillos, pérdida de reducción, pseudoartrosis, retirada de implantes, infección, reoperación	Durante todo el seguimiento	Evita sobrevalorar reducciones de tiempo que no mejoran seguridad.
Implementación	Carga operativa y coste	Tiempo de segmentación, tiempo de impresión, costo por caso, retraso hasta cirugía, impresiones repetidas, descarte intraoperatorio de material	Durante el proceso completo	Aclara si la estrategia es sostenible y en qué escenarios vale la pena.

Fuente: elaboración propia a partir de: (12), (19-21), (33), (39), (43-50).

Por último, conviene subrayar un hallazgo de frontera que sugiere hacia dónde puede evolucionar el campo. El estudio contemporáneo sobre osteotomía de acortamiento cubital asistida por placa guía impresa mostró reducción de tiempo quirúrgico y fluoroscopia con mejor recuperación funcional temprana, lo que indica que el beneficio de la planificación personalizada puede extenderse a otras cirugías de muñeca donde la precisión del corte y del montaje es crítica (49). Este tipo de evidencia translacional no demuestra por sí sola utilidad en fracturas complejas de mano, pero sí refuerza la idea de que la impresión tridimensional es más poderosa cuando se utiliza para convertir una

geometría individual en un acto quirúrgico reproducible.

En síntesis, la impresión tridimensional no debe verse como un complemento cosmético para la presentación de casos complejos ni como una innovación obligatoria para toda fractura. Su valor es selectivo, contextual y dependiente del problema que intenta resolver. Allí donde la cirugía fracasa por no comprender bien la anatomía, por no reproducir un trayecto crítico o por no poder anticipar una deformidad compleja, la tecnología tiene una lógica clínica convincente. Donde esa incertidumbre es baja, la impresión tridimensional probablemente aporte poco más que sofisticación aparente.



El mensaje práctico final es que la impresión tridimensional no debe reemplazar el juicio quirúrgico ni la formación anatómica, sino aumentar la precisión cuando existe incertidumbre espacial relevante. El beneficio más creíble aparece en tres circunstancias: anatomía difícil de imaginar en dos dimensiones, necesidad de reproducir una trayectoria milimétrica y deformidad que exige una corrección multiplanar individualizada. Fuera de esos escenarios, la tecnología puede ser educativa o comunicativa, pero su aporte clínico probablemente sea menor. Esta lectura evita dos extremos: considerarla una moda costosa o adoptarla como obligación universal.

Lectura crítica para la práctica clínica

La tecnología no debería evaluarse solo por el precio del material impreso. El costo real incluye adquisición de tomografía, segmentación, revisión del plan, impresión, posprocesamiento, esterilización, almacenamiento y tiempo del equipo. En trauma agudo, el tiempo de respuesta puede ser el factor limitante; en cirugía electiva, en cambio, la planificación detallada

puede justificar mejor el proceso. Por ello, una estrategia institucional razonable no es imprimir todos los casos, sino priorizar aquellos donde el modelo o la guía modifiquen una decisión concreta y puedan generar ahorro de tiempo, fluoroscopia o complicaciones.

Costo, tiempo de respuesta y priorización

La calidad de la impresión depende de la calidad de la imagen de origen. En cirugía de mano, la tomografía computarizada de cortes finos es especialmente importante porque los fragmentos son pequeños y las superficies articulares tienen tolerancia mínima al error. Un biomodelo creado a partir de una adquisición gruesa, artefactada o mal segmentada puede transmitir una falsa sensación de precisión. Por ello, el radiólogo y el cirujano deben compartir lenguaje sobre qué estructura se está segmentando, qué fragmentos son clínicamente relevantes, dónde hay artefacto por metal y qué parte del modelo puede considerarse confiable. Esta interacción radiológico-quirúrgica es uno de los puntos menos visibles, pero más determinantes, del éxito de la impresión tridimensional.

4. Conclusiones

La impresión tridimensional en cirugía de mano mostró el beneficio más consistente en la mejora de la planificación anatómica y en la eficiencia técnica de procedimientos seleccionados. En fracturas intraarticulares complejas del radio distal y, sobre todo, en fijación del escafoides con guías específicas del paciente, la evidencia apoyó reducciones modestas o moderadas de tiempo quirúrgico y fluoroscopia. En maluniones y osteotomías correctivas, su valor pareció mayor al facilitar una corrección multiplanar individualizada.

No obstante, la superioridad sobre la planificación convencional no fue uniforme. Los beneficios funcionales medidos con escalas reportadas por el paciente fueron inconsistentes, y varios estudios comparativos mostraron resultados neutros cuando la fractura era menos compleja o el flujo convencional ya era eficiente. Por ello, la tecnología parece más útil en casos donde la anatomía, la trayectoria del implante o la deformidad exceden lo que la planificación bidimensional resuelve con suficiencia.

La adopción institucional debería basarse en indicaciones selectivas y evaluarse con diseños antes-después que incluyan métricas técnicas, radiológicas, funcionales y de implementación. El siguiente paso del campo no es imprimir más modelos, sino demostrar con mayor rigor cuándo cambian decisiones, evitan complicaciones y justifican su costo y complejidad.

Fuentes de financiación

No se recibió financiación específica para la elaboración de este manuscrito.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés relacionados con el contenido de este artículo.

Bibliografía

1. Martelli N, Serrano C, van den Brink H, Pineau J, Prognon P, Borget I, et al. Advantages and disadvantages of 3-dimensional printing in surgery: a systematic review. *Surgery*. 2016;159(6):1485-1500.
2. 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.



3. Diment LE, Thompson MS, Bergmann JHM. Clinical efficacy and effectiveness of 3D printing: a systematic review. *BMJ Open*. 2017;7(12):e016891.
4. Matter-Parrat V, Liverneaux P. 3D printing in hand surgery. *Hand Surg Rehabil*. 2019;38(6):338-347.
5. Morgan C, Khatri C, Hanna SA, Ashrafian H, Sarraf KM. Use of three-dimensional printing in preoperative planning in orthopaedic trauma surgery: a systematic review and meta-analysis. *World J Orthop*. 2020;11(1):57-67.
6. Jiang M, Chen G, Coles-Black J, Chuen J, Hardidge A. Three-dimensional printing in orthopaedic preoperative planning improves intraoperative metrics: a systematic review. *ANZ J Surg*. 2020;90(3):243-250.
7. Zhang D, Bauer AS, Blazar P, Earp BE. Three-dimensional printing in hand surgery. *J Hand Surg Am*. 2021;46(11):1016-1022.
8. Keller M, Guebeli A, Thieringer F, Honigmann P. Overview of in-hospital 3D printing and practical applications in hand surgery. *Biomed Res Int*. 2021;2021:4650245.
9. O'Connor O, Patel R, Thahir A, Sy J, Jou E. The use of three-dimensional printing in orthopaedics: a systematic review and meta-analysis. *Arch Bone Jt Surg*. 2024;12(7):441-456.
10. Mounsef PJ, Aita R, Skaik K, Addab S, Hamdy RC. Three-dimensional-printing-guided preoperative planning of upper and lower extremity pediatric orthopedic surgeries: a systematic review of surgical outcomes. *J Child Orthop*. 2024;18(4):360-371.
11. Dababneh S, Dababneh N, El Sewify O, Legler J, Ma X, Chan CM, et al. Three-dimensional printing in hand surgery: what is new? A systematic review. *J Pers Med*. 2025;15(12):611.
12. Roelofs LJM, Assink N, Kraeima J, Ten Duis K, Doornberg JN, de Vries JPPM, et al. Clinical application of 3D-assisted surgery techniques in treatment of intra-articular distal radius fractures: a systematic review in 718 patients. *J Clin Med*. 2024;13(23):7296.
13. Bizzotto N, Tami I, Tami A, Spiegel A, Romani D, Corain M, et al. 3D printed models of distal radius fractures. *Injury*. 2016;47(4):976-978.
14. Chen C, Cai L, Zhang C, Wang J, Guo X, Zhou Y. Treatment of die-punch fractures with 3D

- printing technology. *J Invest Surg.* 2018;31(5):385-392.
15. Chen C, Cai L, Zheng W, Wang J, Guo X, Chen H. The efficacy of using 3D printing models in the treatment of fractures: a randomised clinical trial. *BMC Musculoskelet Disord.* 2019;20(1):65.
 16. Xu J, Zhang G, He Z, Zhong S, Chen Y, Wei C, et al. Anatomical reduction and precise internal fixation of intra-articular fractures of the distal radius with virtual X-ray and 3D printing. *Phys Eng Sci Med.* 2020;43(1):35-47.
 17. Langerhuizen DWG, Doornberg JN, Janssen MMA, Kerkhoffs GMMJ, Jaarsma RL, Janssen SJ. Do 3-D printed handheld models improve surgeon reliability for recognition of intraarticular distal radius fracture characteristics? *Clin Orthop Relat Res.* 2020;478(12):2901-2908.
 18. Grinčuk A, Petryla G, Masionis P, Sveikata T, Uvarovas V, Makulavičius A. Short-term results and complications of the operative treatment of the distal radius fracture AO2R3 C type, planned by using 3D-printed models. Prospective randomized control study. *J Orthop Surg (Hong Kong).* 2023;31(2):10225536231195127.
 19. Sebastián Giraldo PÁ, Elvira Soler M, Fernández Kang A, Martínez Martínez F, García López A. Randomized clinical trial on the usefulness of 3D printing in intra-articular fractures of the distal radius. *Rev Esp Cir Ortop Traumatol.* 2025;69(2):199-205.
 20. Casari FA, Roner S, Fürnstahl P, Nagy L, Schweizer A. Computer-assisted open reduction internal fixation of intraarticular radius fractures navigated with patient-specific instrumentation, a prospective case series. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2021;141(8):1425-1432.
 21. de Muinck Keizer RJO, Lechner KM, Mulders MAM, Schep NWL, Eygendaal D, Goslings JC. Three-dimensional virtual planning of corrective osteotomies of distal radius malunions: a systematic review and meta-analysis. *Strat Traum Limb Recon.* 2017;12(2):77-89.
 22. Honigmann P, Thieringer F, Steiger R, Haefeli M, Schumacher R, Henning J. A simple 3-dimensional printed aid for a corrective palmar opening wedge osteotomy of the distal radius. *J Hand Surg Am.* 2016;41(3):464-469.
 23. Inge S, Brouwers L, van der Heijden F, Bemelman M. 3D printing for corrective osteotomy of malunited distal



- radius fractures: a low-cost workflow. *BMJ Case Rep.* 2018;2018:bcr2017223996.
24. Roner S, Carrillo F, Vlachopoulos L, Schweizer A, Nagy L, Fürnstahl P. Improving accuracy of opening-wedge osteotomies of distal radius using a patient-specific ramp-guide technique. *BMC Musculoskelet Disord.* 2018;19(1):374.
 25. Oka K, Shigi A, Tanaka H, Moritomo H, Arimitsu S, Murase T. Intra-articular corrective osteotomy for intra-articular malunion of distal radius fracture using three-dimensional surgical computer simulation and patient-matched instrument. *J Orthop Sci.* 2020;25(5):847-853.
 26. Belloti JC, Alves BVP, Faloppa F, Balbachevsky D, Archetti Netto N, Tamaoki MJS. The malunion of distal radius fracture: corrective osteotomy through planning with prototyping in 3D printing. *Injury.* 2021;52 Suppl 3:S44-S48.
 27. Belloti JC, Alves BVP, Archetti N, Nakachima LR, Faloppa F, Tamaoki MJS. Treatment of distal radio vicious consolidation: corrective osteotomy through 3D printing prototyping. *Rev Bras Ortop (Sao Paulo).* 2021;56(3):384-389.
 28. Schindele S, Oyewale M, Marks M, Brodbeck M, Herren DB. Three-dimensionally planned and printed patient-tailored plates for corrective osteotomies of the distal radius and forearm. *J Hand Surg Am.* 2024;49(3):277.e1-277.e8.
 29. Murase T. Surgical technique of corrective osteotomy for malunited distal radius fracture using the computer-simulated patient matched instrument. *J Hand Surg Asian Pac Vol.* 2016;21(2):133-139.
 30. Osagie L, Shaunak S, Murtaza A, Cerovac S, Umarji S. Advances in 3D modeling: preoperative templating for revision wrist surgery. *Hand (N Y).* 2017;12(5):NP68-NP72.
 31. Horas K, Hoffmann R, Faulenbach M, Heinz SM, Langheinrich A, Schweigkofler U. Advances in the preoperative planning of revision trauma surgery using 3D printing technology. *J Orthop Trauma.* 2020;34(5):e181-e186.
 32. Tetsworth K, Block S, Glatt V. Putting 3D modelling and 3D printing into practice: virtual surgery and preoperative planning to reconstruct complex post-traumatic skeletal deformities and defects. *SICOT J.* 2017;3:16.



33. Li LX, Kedgley AE, Horwitz MD. A review of the use of 3D printing technology in treatment of scaphoid fractures. *J Hand Surg Asian Pac Vol.* 2023;28(1):22-33.
34. Houdek MT, Matsumoto JM, Morris JM, Bishop AT, Shin AY. Technique for 3-Dimensional (3D) modeling of osteoarticular medial femoral condyle vascularized grafting to replace the proximal pole of unsalvagable scaphoid nonunions. *Tech Hand Up Extrem Surg.* 2016;20(3):117-124.
35. Jew N, Lipman JD, Carlson MG. The use of three-dimensional printing for complex scaphoid fractures. *J Hand Surg Am.* 2019;44(2):165.e1-165.e6.
36. Guo Y, Tian G, Zlotolow DA, Tian W, Zhong W, Sun L. A cadaveric study on the accuracy of an individualized guiding template to assist scaphoid fixation using computed tomography and 3-dimensional printing. *J Hand Surg Am.* 2019;44(3):251.e1-251.e6.
37. Salabi V, Rigoulot G, Sautet A, Cambon-Binder A. Three-dimensional-printed patient-specific Kirschner-wire guide for percutaneous fixation of undisplaced scaphoid fractures: a cadaveric study. *J Hand Surg Eur Vol.* 2019;44(7):692-696.
38. DeWolf MC, Hartov A, Fortney TA, Warhold LG. Three-dimensional printed targeting device for scaphoid fracture fixation. *Hand (N Y).* 2022;17(1):134-140.
39. Marcano-Fernández FA, Berenguer A, Fillat-Gomà F, Corderch-Navarro S, Cámara-Cabrera J, Sánchez-Flò R. A customized percutaneous three-dimensional-printed guide for scaphoid fixation versus a freehand technique: a comparative study. *J Hand Surg Eur Vol.* 2021;46(10):1081-1087.
40. Rong C, Zhu S, Zhang Q, Xu H, Zhang L, Han Q. Minimally invasive percutaneous screw guided by 3-dimensional-printed guide for the treatment of scaphoid fractures. *J Hand Surg Am.* 2023;48(12):1279.e1-1279.e7.
41. Peeters W, Verstreken F, Vanhees M. Correction of scaphoid nonunion humpback deformity using three-dimensional printing technology. *J Hand Surg Eur Vol.* 2021;46(4):430-432.
42. Oki S, Matsuo T, Furuhashi R, Iwabuchi S. Scaphoid non-union with pre-existing screws treated by 3D preoperative planning. *BMJ Case Rep.* 2021;14(1):e239548.



43. Rong C, Zhang Q, Zhu S, Zhang G, Zeng J, Han Q, et al. 3D printed guide-assisted percutaneous screw fixation for minimally displaced scaphoid waist fractures with delayed diagnosis or presentation. *BMC Musculoskelet Disord.* 2024;25(1):127.
44. Wagner GA, Glennon A, Sieberer JM, Tommasini SM, Lattanza LL. A patient-specific three-dimensional-printed surgical guide for dorsal scaphoid fracture fixation: a comparative cadaver study. *J Hand Surg Glob Online.* 2025;7(2):158-166.
45. Brichacek M, Diaz-Abele J, Shiga S, Petropolis C. Three-dimensional printed surgical simulator for Kirschner wire placement in hand fractures. *Plast Reconstr Surg Glob Open.* 2018;6(3):e1706.
46. Prsic A, Boyajian MK, Snapp WK, Crozier J, Woo AS. A 3-dimensional-printed hand model for home-based acquisition of fracture fixation skills without fluoroscopy. *J Surg Educ.* 2020;77(6):1341-1344.
47. Papavasiliou T, Chatzimichail S, Chan JCY, Bain CJ, Uppal L. A standardized hand fracture fixation training framework using novel 3D printed ex vivo hand models: our experience as a unit. *Plast Reconstr Surg Glob Open.* 2021;9(2):e3406.
48. Raeker-Jordan E, Martinez M, Shimada K. 3D printing of customizable phantoms to replace cadaveric models in upper extremity surgical residency training. *Materials (Basel).* 2022;15(2):694.
49. Dong Z, Yang S, Zhao Y, Duan Y, Zheng C, Guo L, et al. Improved perioperative outcomes and early functional recovery with 3D-printed osteotomy guide plates in ulnar shortening osteotomy: a retrospective study. *J Exp Orthop.* 2025;12(4):e70553.
50. Al-Dahan T, Virani S, Asardag AN, Seoudi N, Izedonmwon I, Sherpa N, et al. Fluoroscopy exposure during distal radius fracture fixation: an audit of current practice. *Cureus.* 2025;17(12):e99719.