

Nuevas tendencias en artrodesis total de muñeca: cirugía asistida por computador

New trends in total wrist arthrodesis: computer-assisted surgery

(Trabajo ganador de mención de honor en el Concurso de Práctica Clínico-quirúrgica del XXXIX Congreso Nacional de la SCCP, Premio León Hernández)

CARLOS EDUARDO TORRES F*, MD.; DIEGO FELIPE CAMARGO G**, MD

Palabras clave: cirugía asistida por computador, impresión tridimensional, artrodesis total de muñeca.

Key words: computer assisted surgery, three dimensional printing, total wrist arthrodesis.

Abstract

Total wrist arthrodesis (TWA) is a surgical procedure used to treat multiple inflammatory and degenerative pathologies associated to chronic pain and wrist instability. Whilst the surgical planning is conducted by reviewing two dimensional images, which entails exemplification and understanding biases, the execution includes generic plates that are not necessarily appropriate for the patient. In that sense, to follow a surgery assisted by computer (CAS) represents an innovative alternative to sort such limitations.

The aim of this series of cases is to describe the introduction of CAS in TWA as a novel surgical technique in five cases, its basis, advantages and disadvantages. The outcomes evaluated include postoperative pain, satisfaction, and complications; the results were described using central tendency measures. The implementation of CAS represented the new possibility of designing and applying specific tools and plates on cases where conventional techniques were not handfull. No complications were reported and a 35% reduction in pain perception was observed, as well as 100 % rates of satisfaction after one year of follow - up. This technique may be considered as a new useful tool to address shortcomings related with conventional treatments.

Resumen

La Artrodesis Total de Muñeca (ATM) es uno de los procedimientos indicados en el tratamiento de múltiples patologías inflamatorias-degenerativas asociadas a dolor e inestabilidad de la muñeca. Normalmente, su planeamiento se realiza mediante imágenes diagnósticas en 2 dimensiones, que traen consigo sesgos de interpretación y ejemplificación; mientras que su ejecución, se realiza mediante implantes genéricos que no siempre son útiles para los pacientes. La implementación de cirugía asistida por computador (CAS) es una alternativa aún no reportada, que puede corregir dichas limitaciones. Esta serie de casos describe la técnica quirúrgica realizada en 5 pacientes llevados a ATM con CAS, así como sus fundamentos, ventajas y desventajas. Se valoraron: complicaciones, dolor y satisfacción posoperatoria, reportándose a través de medidas de tendencia central. La introducción de CAS permitió el diseño e implementación de herramientas e implantes a medida en casos en donde las técnicas convencionales no eran útiles. Tras un año de seguimiento, no se reportaron complicaciones; hubo una disminución en la percepción del dolor del 35% y una tasa de satisfacción del 100% en el posoperatorio. Esta técnica puede considerarse una alternativa novedosa y útil para suplir las falencias asociadas a las técnicas convencionales.

Introducción

La artrodesis total de muñeca (ATM) es el procedimiento quirúrgico que permite fusionar el radio con los huesos del carpo con el fin de brindar estabilidad a la

muñeca, disminuir la percepción de dolor y conservar funcionalidad, a cambio de restricción en arcos de movilidad. Sus indicaciones resultan ser un amplio escenario de trastornos inflamatorio-degenerativos asociados

a dolor incapacitante e inestabilidad articular, en donde los métodos convencionales de tratamiento no quirúrgicos no han obtenido resultados satisfactorios o las técnicas de remplazo articular han fallado o no están indicados¹. Su implementación se ha descrito en patologías como artritis reumatoide, osteoartritis postraumática, parálisis cerebral, lesiones de plexo braquial y secuelas de tratamiento oncológico²⁻⁶, y a pesar de que, se cuenta con otras opciones de tratamiento consideradas igualmente benéficas y costo efectivas, como la artroplastia de muñeca, la ATM se implementa con una relación 5:1⁷⁻⁹

En las últimas tres décadas, se han descrito tasas de complicaciones marcadamente altas y variables (68%-17%)¹⁰⁻¹², que han llevado a múltiples modificaciones en su técnica desde su primera descripción hace más de 100 años¹³⁻¹⁵. Sin embargo, la inclusión de herramientas tecnológicas computacionales en la práctica quirúrgica, como cirugía asistida por computador (CAS), el diseño asistido por computador (CAD), la manufactura asistida por computador (CAM) y realidad aumentada (AR), plantan la posibilidad de realizar procedimientos más seguros, con menor morbilidad e igualmente efectivos que las técnicas convencionales¹⁶.

Algunas especialidades como la neurocirugía, la cirugía ortopédica, cirugía urológica y la cirugía craneofacial, las han incluido de manera rutinaria en sus procedimientos, evidenciando resultados beneficiosos para el paciente, el equipo quirúrgico e incluso el sistema de salud¹⁷⁻²¹. A pesar de que en los últimos 10 años ha habido un auge en la implementación de CAS-CAM-CAD en el planeamiento, ejecución y rehabilitación operatoria en cirugía de mano, su inclusión no se ha descrito en ATM. La mayoría de estos estudios corresponden a cohortes de naturaleza descriptiva, que se enfocan en el tratamiento de mal uniones de escafoides y radio distal, reportando beneficios de mayor precisión en el planeamiento y ejecución quirúrgica, menor tiempo operatorio, menor exposición a fluoroscopia intraoperatoria y mejores desenlaces posoperatorios²²⁻²⁴, impulsando a otros cirujanos de mano a proponer otros escenarios, en donde su implementación puede ser útil. Con este estudio se pretende describir su inclusión en la técnica de ATM asistida por computador; se explicarán sus fundamentos, beneficios y limitaciones.

Técnica quirúrgica

Planeamiento quirúrgico

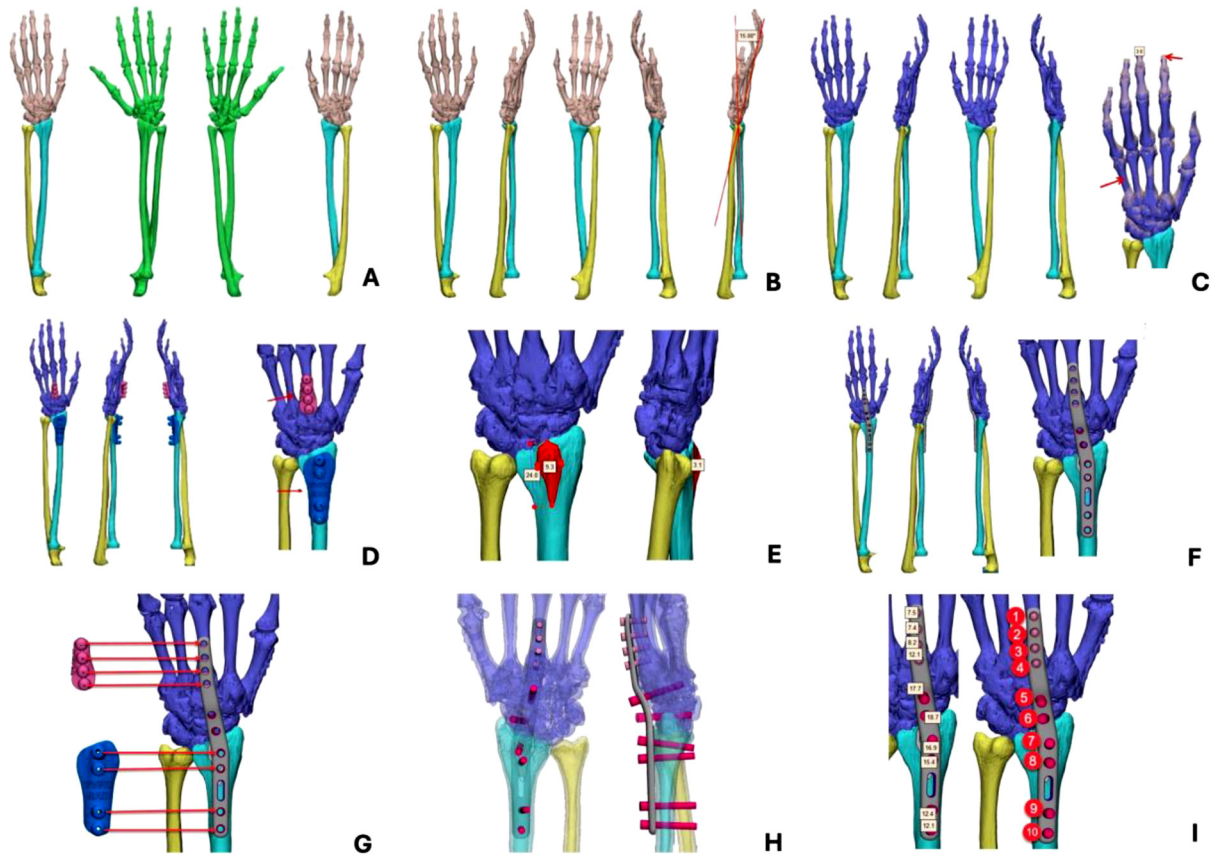
Para comenzar con la planificación quirúrgica asistida por computador se debe solicitar una tomografía axial computarizada (TAC) de muñeca en alta resolución (cortes menores 1mm). Dicha información es introducida en formato DICOM al software de CAD (*Techfit, Inc. Daytona Beach, FL, USA*), lo que permite:

1. Obtener una descripción topográfica y geométrica de la estructura anatómica a partir de su reconstrucción tridimensional.
2. Realizar el proceso de segmentación 3D para delimitar y modificar estructuras anatómicas de interés.
3. Simular las osteotomías y desplazamientos de los segmentos anatómicos, y con ello estimar el gap óseo y requerimiento de sustitutos óseos o injertos (figura 3).
4. Diseñar los biomodelos, guías de corte y material de osteosíntesis a medida del paciente en formato SLT (Standard Triangle Language, para su posterior manufactura mediante impresión 3D (3DP) (figura 4).
5. Transferir el planeamiento quirúrgico al software de NAI con RA (*Techfit, Inc. Daytona Beach, FL, USA*).

Dicho proceso lo realiza un ingeniero biomédico en compañía del cirujano de mano. Las guías de corte y biomodelos son manufacturados en Acrilonitrilo Butadieno Estireno mediante técnica de (CAM-3DP) de estereolitografía (*Dimension SST; Stratasys, Inc. Eden Prairie, MN, USA*), mientras que la placa de osteosíntesis y tornillos, son manufacturadas en aleación de titanio con tecnología de control numérico computarizado (CNC). Una vez se verifican sus características, son llevados a proceso de esterilización quirúrgica para su posterior utilización (figura 1).

Procedimiento quirúrgico

Para esta etapa la utilización de RA cobra gran importancia, ya que permite visualizar a través de un dispositivo móvil, el planeamiento quirúrgico en tiempo real y sobre el paciente, permitiendo identificar las estructuras anatómicas de interés sin haber incidido la piel.



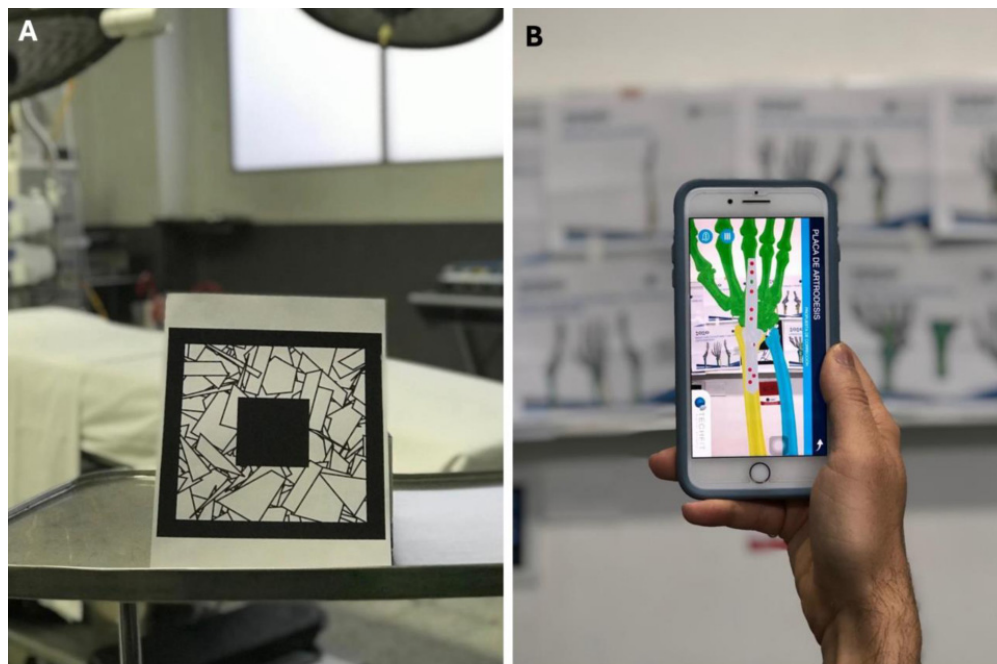
A) Reconstrucción 3D de estado inicial del paciente. B) Planeamiento de posición final de muñeca a 15 grados de extensión. C) Sobreposición de imágenes: posición inicial y final con discrepancia de 3 mm. D) Diseño de guías de perforación (distal - rosado) 15 mm, (proximal – azul) 20 mm. E) Diseño de osteotomía sobre cara dorsal de radio distal para mejor adosamiento de implante. F) Diseño de placa de titanio con perfil de 3 mm en radio y 2.5 mm en mano. G) Relación de las guías de perforación con orificios de fijación. H) Simulación de orientación de tornillos de fijación. I) Diseño de tornillos de fijación y simulación de su colocación.

Figura 1. Planeamiento quirúrgico de ATM izquierda asistido por CAS.

Para su visualización en el dispositivo móvil, el soporte logístico de la casa comercial nos comparte un código QR que es identificado por la aplicación móvil (*Techfit, Inc. Daytona Beach, FL, USA*), resultando en la interposición del planeamiento virtual, sobre el paciente, a través del dispositivo móvil (figura 2).

Para iniciar el procedimiento, se realiza una incisión longitudinal al tercer metacarpiano sobre su cara dorsal, extendiéndose hasta la porción distal del radio. Posteriormente se efectúa disección, teniendo en cuenta no lesionar las ramas del nervio cutáneo dorsal del nervio radial, ni el tendón de *Extensor Pollicis Longus*. Después, se incide de manera longitudinal el retináculo ex-

tensor entre el tercer y cuarto compartimento y se realiza la capsulotomía para la consecuente exposición del carpo. Una vez expuesto, ejecuta la resección del cartílago articular radiocarpiano e intercarpiano. Dependiendo del caso se realiza concomitantemente la carpectomía de la primera fila del carpo y la toma de los injertos óseos para su posicionamiento en los espacios de la zona de fusión. Para este punto, ya se exponen el tercer metacarpiano, el carpo y la porción distal radio en su cara dorsal. Posteriormente, se posicionan las guías de corte para la osteotomía, en caso de requerirse, y se procede a la osteotomía del tubérculo de Lister con fresa. La posición de la muñeca varía de acuerdo con la necesidad del



A) Código QR B) Visualización de planeamiento quirúrgico mediante RA a través de smartphone

Figura 2. Visualización de planeamiento quirúrgico mediante RA.

paciente, bien sea en neutro o en extensión. Finalmente, se fija la placa de osteosíntesis hecha a medida del paciente. Los tornillos se fijan desde el orificio más distal, ubicado en el tercer metacarpiano hasta el orificio más proximal, ubicado en la porción distal del radio. Por último, se corrobora la posición del material de osteosíntesis mediante fluoroscopia y se procede al cierre del abordaje quirúrgico por planos (figura 3 y 4).

Materiales y métodos

Es un estudio de series de casos con descripción de técnica quirúrgica, en donde se describen 5 casos llevados a ATM mediante CAS entre el año 2019 y 2023. Se valoraron desenlaces como requerimiento intraoperatorio de fluoroscopia, tiempo operatorio, complicaciones tras un año de seguimiento, percepción de dolor y satisfacción posoperatoria, mediante la valoración retrospectiva de la descripción quirúrgica e historia clínica de valoraciones pre y posoperatorias. Se excluyeron pacientes con historia clínica incompleta o con seguimientos posoperatorios menores a un año. Para la valoración de dolor se implementaron escalas análogas, mientras que la percepción de satisfacción

fue descrita por los pacientes de manera nominal. El análisis de datos se realizó mediante medidas de tendencia central.

Para la discusión, se realizó una búsqueda de la literatura en bases de datos como: Pubmed, Ovid y ScienceDirect. Las palabras clave y términos Mesh utilizadas fueron: “*surgery, computed assisted*”, “*printing, three dimensional*”, “*augmented reality*”, “*hand*”, “*wrist*”, “*wrist joint*”, “*arthrodesis*” y “*articular fusion*”. Se incluyeron artículos en inglés y español, con población adulta y pediátrica. Se excluyeron artículos en otros idiomas a los mencionados y artículos incompletos. De igual manera, se agregaron artículos de forma directa que estuvieran citados en otros manuscritos, siempre y cuando cumplieran los criterios mencionados. No se tuvo en cuenta la fecha de publicación ni el tipo de estudio como criterio de inclusión o exclusión. Los autores no tienen conflictos de interés por declarar.

Resultados

Se incluyeron 5 pacientes con edad promedio de 34,6 años. El 60% fueron hombres. Las patologías de base asociadas fueron: lesión de plexo braquial y la



A) Marcación quirúrgica. B) Modelos esterolitográficos con guías de perforación a medida manufacturadas mediante impresión 3D. C) Modelo esterolitográficos en escala real. D) Exposición de carpo y articulación radio carpiana. E) Osteotomía de cara dorsal de radio distal según planeamiento y resección de cartílago articular e intercarpiano mediante fresado. F) Restos de resección previa. G) Exposición de articulación radiocarpiana y carpo proximal. H) Implantes hechos a medida. I) Fijación de placa de osteosíntesis hecha a medida. J) Proyección lateral de fluoroscopia intraoperatoria. K) Proyección PA de fluoroscopia intraoperatoria.

Figura 3. Procedimiento ATM izquierda asistida por CAS.

artrosis radiocarpiana postraumática. En 3 de los pacientes se realizaron procedimientos adicionales durante el mismo tiempo quirúrgico. En todos los procedimientos se requirió de fluoroscopia intraoperatoria y se describió un tiempo operatorio menor a 3 horas en el 100% de los casos. La media de percepción de dolor

preoperatorio mediante escala análoga de dolor fue de 7 (de 3,2) con una reducción 35 % tras un año de la intervención. De igual manera el 100% de los pacientes manifestaron sentirse satisfechos con el procedimiento y no se reportaron complicaciones tras un año de seguimiento (tabla 1, figura 5).



A) Foto preoperatoria con colgajo ALT en tercio distal de antebrazo izquierdo. B) Modelo esterolitográfico en escala real manufacturados mediante impresión 3D y exposición de articulación radiocarpiana. C) Guías de perforación a medida manufacturada mediante impresión 3D. D) Posicionamiento y estabilización de placa de osteosíntesis con clavos de Kirschner. E) Fijación de placa de osteosíntesis hecha a medida con forma en Y. F) Proyección lateral y PA de radiografía en postoperatorio inmediato

Figura 4. ATM asistida por CAS con diseño de placa en Y.



A) Abordaje quirúrgico con cicatriz madura. B) Radiografía control con material de osteosíntesis en posición y consolidación ósea sin alteraciones. C) Artrodesis total de muñeca izquierda funcional

Figura 5. Control posoperatorio de ATM asistida por CAS tras 16 meses de la intervención.

Tabla 1. Descripción de los pacientes llevados a ATM asistida por CAS.

Edad (años)	Sexo	Lateralidad	Patología base	Percepción de dolor preoperatorio	Percepción de dolor Postoperatorio	Percepción de satisfacción tras el procedimiento
22	F	Diestro	LPB	10	7	Satisfecho
27	F	Diestro	LBP	7	5	Satisfecho
22	M	Diestro	ARCP	7	2	Satisfecho
42	M	Diestro	ARCP	1	1	Satisfecho
60	M	Diestro	ARCP	10	8	Satisfecho

M: Masculino; F: Femenino; LBP: lesión de plexo braquial; ARCP: artrosis radiocarpiana postraumática

Discusión

Fundamentos de CAS - CAD - CAM

CAS es un concepto propuesto hace más de 40 años, que hace referencia a la implementación de tecnologías computacionales en la planificación, ejecución y rehabilitación de procedimientos quirúrgicos²⁵. Su investigación e implementación han aumentado de manera considerable en los últimos 10 años, debido a los avances tecnológicos y a la necesidad de realizar procedimientos quirúrgicos con mayor eficiencia y seguridad²⁶. A partir de CAS, se derivan dos conceptos importantes:

Diseño Asistido por Computador (CAD)

Se refiere al uso de tecnologías computacionales para la creación, modificación y optimización de diseños. A través de este, se pueden realizar diseños virtuales de biomodelos, herramientas quirúrgicas e implantes, así como, la simulación virtual de su funcionamiento.

Manufactura Asistida por Computador (CAM)

Uso de tecnologías computacionales para la programación de máquinas que intervienen en los procesos de manufactura de biomodelos, herramientas e implantes quirúrgicos.

Dichos conceptos, son los cimientos que permitieron implementar en cirugía, dos herramientas tecnológicas descritas en esta técnica:

Impresión 3D

Proceso de manufactura aditiva que se caracteriza por la deposición de un material sintético de manera secuencial y en dos dimensiones, con el fin de crear objetos tridimensionales, a partir de un diseño previo. Este proceso permite la impresión de biomodelos, herramientas quirúrgicas e implantes. Para llegar a dicho resultado, el diseño de la impresión puede realizarse de *novo* a través de CAD o basarse en un modelo previo, como imágenes obtenidas mediante TAC. En este último caso, el proceso de segmentación cobra gran importancia, ya que este permite la modificación y/o delimitación de las estructuras anatómicas de interés para la impresión²⁷.

Realidad aumentada

Utilización de tecnologías para la superposición de información digital en el mundo real. Fue descrito por

primera vez en 1968 por *Sutherland*²⁸, y partir de allí se ha expandido más allá del uso médico, como la industria militar, educativa y de entretenimiento. La diferencia de AR con los sistemas convencionales de NAI es que AR no requiere de la interacción cirujano-monitor fuera del campo quirúrgico, lo que permite visualizar en tiempo real y sobre el paciente, el planeamiento quirúrgico y las estructuras anatómicas de interés, incluso sin haber incidido la piel del paciente²⁹.

Evidencia CAS - CAD - CAM

Tradicionalmente, el planeamiento quirúrgico de TWA parte de una radiografía convencional de muñeca, un examen considerado accesible y asequible. No obstante, presenta limitaciones asociadas a la deficiente caracterización de estructuras esféricas y deformidades rotacionales, el factor de magnificación y los sesgos asociados a la posición del paciente durante la toma del examen³⁰. La implementación de CAS ha demostrado solventar dichas limitaciones. Estudios publicados, incluso hace más de 20 años, han descrito las ventajas de su utilización en la caracterización de deformidades rotacionales durante el planeamiento de correcciones de mal unión de radio distal³¹⁻³³. De igual manera, *Yasukaso et al.*, demostró que su implementación para el planeamiento virtual 3D de fracturas de radio distal, permitió mayor precisión en la elección de material de osteosíntesis, respecto al grupo en quien se realizó el planeamiento quirúrgico con imágenes en 2 dimensiones ($p < 0,01$)³⁴.

Es importante considerar el impacto que genera la CAS - CAD - CAM en el tiempo empleado para el planeamiento quirúrgico. El estudio de *Buijze et al.*, comparó el tiempo de planeamiento quirúrgico asistido por computador con los métodos convencionales, en cirugía de mal unión de radio distal, evidenciando que la inclusión de CAS representó un tiempo menor de planeamiento, pero sin diferencias estadísticamente significativas³⁵. Otros estudios, como el descrito por *Thomas et al.*, encontraron que la implementación de CAS disminuyó a menos de 20 minutos el tiempo de planeamiento quirúrgico en fracturas de platillos tibiales³⁶.

Por otra parte, se debe resaltar que CAS - CAD - CAM permiten simular virtualmente acciones quirúrgicas, y con ello, diseñar y manufacturar las herramientas nece-

sarias para realizar el procedimiento con mayor precisión. La experiencia descrita por *Athlani et al.*, demostró que el diseño e implementación de guías de corte y toma de injerto, en el tratamiento de mal unión de radio distal, permitió el restablecimiento de la varianza cubital, la inclinación volar e inclinación radial, incluso, sin encontrar diferencias estadísticamente significativas respecto a las estimadas en el planeamiento virtual y las medidas de la extremidad contralateral sana³⁷. De igual manera, *Muinck Keizer et al.*, reportó a través de su revisión sistemática de la literatura, en el mismo tipo de población, que la implementación de CAS - CAD - CAM representó mejoras estadísticamente significativas en desenlaces radiológicos y funcionales (Rangos flexo-extensión; pronosupinación; fuerza de agarre), así como menores tasas de complicaciones posoperatorias respecto a otras cohortes con poblaciones similares y métodos convencionales de planeamiento y ejecución²⁴. Resultados similares, también se han descrito en cirugía correctivas de mal unión de escafoides, metacarpianos y falanges^{38,39}.

La manufactura de implantes a medida resulta ser, en nuestra opinión, la herramienta más provechosa para TWA, pues permite la optimización de tiempo quirúrgico y evita la repetitiva manipulación de la placa de osteosíntesis para su modelamiento, y con ello, el riesgo de afectar su biomecánica⁴⁰. La literatura, describe su implementación en cirugía de mano tanto en la manufactura de prótesis como de material de osteosíntesis, reportando resultados favorables en términos de seguridad y funcionalidad^{41,42}. Sus propiedades biomecánicas, fueron descritas en el estudio de *Kim et al.*, en donde se comparó una placa de osteosíntesis de aleación de titanio manufacturada mediante (CAM - 3DP) con otras 2 placas que se utilizan convencionalmente para la fijación de fracturas de radio distal, concluyendo que la placa experimental tiene características biomecánicas similares y comparables a las convencionales⁴³. Su implementación, en otros campos de la cirugía ortopédica, se ha traducido en mayor precisión en el procedimiento, menor exposición fluoroscópica y menor tiempo operatorio⁴⁰.

Por otra parte, el uso de AR como herramienta de NIA, ha sido bien descrita por ramas de la cirugía ortopédica, como cirugía de columna, cadera y rodilla. Se han descrito beneficios de su implementación, como procedimientos

quirúrgicos más cortos, con menor requerimiento de fluoroscopia intraoperatoria y con mayor precisión en acciones quirúrgicas²⁹. No obstante, en cirugía de mano su evidencia es prácticamente nula. El estudio cadavérico de *Gregory et al.*, implementó AR como herramienta de NAI para la fijación percutánea de fracturas de escafoides, describiendo desenlaces positivos. Sin embargo, no se cuenta con evidencia en pacientes vivos. Su mayor utilidad se ha descrito en la rehabilitación de miembro superior, en donde ha demostrado ser una herramienta valiosa la reeducación muscular⁴⁴.

Con relación a las limitaciones de esta técnica, se resaltan 2 aspectos: el primero, es el acceso a CAS y la logística requerida para su implementación, incluyendo la TAC de alta resolución, el software de planeamiento virtual y su soporte, la impresora 3D, y el software y hardware de AR; la segunda, es su costo. En esta cohorte su implementación tuvo un costo adicional de 2.500 - 4.000 USD por paciente. Otras series, como la descrita por *Byrne et al.*, que describió que su implementación en el tratamiento de mal uniones diafisarias de radio, representó un costo adicional de 4.300 USD por paciente⁴¹. A pesar de que esto representa un aumento en el costo de global de atención, otras ramas de la cirugía ortopédica como la cirugía de rodilla, han demostrado que su inclusión es costo - efectiva¹⁷.

Conclusiones

Es evidente la necesidad de realizar estudios de mayor evidencia para determinar su impacto en desenlaces funcionales y complicaciones. No obstante, se considera *a priori*, que la implementación de CAS solventa varias de las limitaciones presentadas durante el planeamiento y ejecución de TWA con técnicas convencionales. Es un buen punto de partida para continuar con su investigación. Vencer las barreras de accesibilidad y asequibilidad, serán claves para determinar su costo- efectividad.

Referencias

1. Wei DH, Feldon P. Total Wrist Arthrodesis. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*. 2017;25(1):3-11.
2. RAUHANIEMI J, TIUSANEN H, SIPOLA E. Total Wrist Fusion: A Study of 115 Patients. *Journal of Hand Surgery*. 2005;30(2): 217-219.
3. Green DP, Henderson CJ. Modified AO Arthrodesis of the Wrist (With Proximal Row Carpectomy). *J Hand Surg Am*. 2013;38(2): 388-391.

4. Van Heest AE, Strothman D. Wrist Arthrodesis in Cerebral Palsy. *J Hand Surg Am.* 2009;34(7):1216-1224.
5. Addosooki A, Doi K, Hattori Y, Wahegaonkar A. Role of Wrist Arthrodesis in Patients Receiving Double Free Muscle Transfers for Reconstruction Following Complete Brachial Plexus Paralysis. *J Hand Surg Am.* 2012;37(2):277-281.
6. Bianchi G, Sambri A, Marini E, Piana R, Campanacci DA, Donati DM. Wrist Arthrodesis and Osteoarticular Reconstruction in Giant Cell Tumor of the Distal Radius. *J Hand Surg Am.* 2020;45(9):882.e1-882.e6.
7. Cavaliere CM, Chung KC. A Cost-Utility Analysis of Nonsurgical Management, Total Wrist Arthroplasty, and Total Wrist Arthrodesis in Rheumatoid Arthritis. *J Hand Surg Am.* 2010;35(3):379-391.e2.
8. Cavaliere CM, Chung KC. A Systematic Review of Total Wrist Arthroplasty Compared with Total Wrist Arthrodesis for Rheumatoid Arthritis. *Plast Reconstr Surg.* 2008;122(3):813-825.
9. Hinds RM, Capo JT, Rizzo M, Roberson JR, Gottschalk MB. Total Wrist Arthroplasty Versus Wrist Fusion: Utilization and Complication Rates as Reported by ABOS Part II Candidates. *Hand.* 2017;12(4):376-381.
10. Zachary S V., Stern PJ. Complications following AO/ASIF wrist arthrodesis. *J Hand Surg Am.* 1995;20(2):339-344.
11. Zhu XM, Perera E, Gohal C, Dennis B, Khan M, Alolabi B. A systematic review of outcomes of wrist arthrodesis and wrist arthroplasty in patients with rheumatoid arthritis. *Journal of Hand Surgery (European Volume).* 2021;46(3):297-303.
12. Hazewinkel MHJ, Lans J, Lunn KN, Garg R, Eberlin KR, Chen NC. Complications and Factors Associated with Reoperation following Total Wrist Fusion. *J Wrist Surg.* 2020;9(06):498-508.
13. Hayden RJ, Jebson P. Wrist Arthrodesis. *Hand Clin.* 2005;21(4):631-640.
14. Nazerani S, Nazerani T, Molayem A, Keramati M. A Modified Surgical Technique for Minimally Invasive Arthroscopic Total Wrist Fusion. *J Wrist Surg.* 2019;08(01):084-088.
15. Ely LW. An operation for tuberculosis of the wrist. *JAMA: The Journal of the American Medical Association.* 1920;75(25):1707.
16. Ochsner JL. Minimally invasive surgical procedures. *Ochsner J.* 2000;2(3):135-136.
17. Li H, Zhuang T, Wu W, et al. A systematic review on the cost-effectiveness of the computer-assisted orthopedic system. *Health Care Science.* 2022;1(3):173-185.
18. van Oosterom MN, van der Poel HG, Navab N, van de Velde CJH, van Leeuwen FWB. Computer-assisted surgery: Virtual and augmented reality displays for navigation during urological interventions. *Curr Opin Urol.* 2018;28(2):205-213.
19. Passias PG, Brown AE, Alas H, et al. A cost benefit analysis of increasing surgical technology in lumbar spine fusion. *The Spine Journal.* 2021;21(2):193-201.
20. Elmi-Terander A, Burström G, Nachabé R, et al. Augmented reality navigation with intraoperative 3D imaging vs fluoroscopy-assisted free-hand surgery for spine fixation surgery: a matched-control study comparing accuracy. *Sci Rep.* 2020;10(1):707.
21. Apostolakis D, Michelinakis G, Kamposiora P, Papavasiliou G. The current state of computer assisted orthognathic surgery: A narrative review. *J Dent.* 2022;119:104052.
22. Kong L, Yang G, Yu J, et al. Surgical treatment of intra-articular distal radius fractures with the assistance of three-dimensional printing technique. *Medicine.* 2020;99(8):e19259.
23. DeWolf MC, Hartov A, Fortney TA, Warhold LG. Three-Dimensional Printed Targeting Device for Scaphoid Fracture Fixation. *HAND.* 2022;17(1):134-140.
24. Eygendaal D, de Muinck Keizer RJO, Goslings JC, Schep NWL, Lechner KM, Mulders MAM. Three-dimensional virtual planning of corrective osteotomies of distal radius malunions: a systematic review and meta-analysis. *Strategies Trauma Limb Reconstr.* 2017;12(2):77-89.
25. Sugano N. Computer-assisted orthopedic surgery. *Journal of Orthopaedic Science.* 2003;8(3):442-448.
26. Ranev D, Teixeira J. History of Computer-Assisted Surgery. *Surgical Clinics of North America.* 2020;100(2):209-218.
27. Zhang D, Bauer AS, Blazar P, Earp BE. Three-Dimensional Printing in Hand Surgery. *J Hand Surg Am.* 2021;46(11):1016-1022.
28. Sutherland IE. A head-mounted three dimensional display. In: *Proceedings of the December 9-11, 1968, Fall Joint Computer Conference, Part I on - AFIPS '68 (Fall, Part I).* ACM Press; 1968:757.
29. Keating TC, Jacobs JJ. Augmented Reality in Orthopedic Practice and Education. *Orthopedic Clinics of North America.* 2021;52(1):15-26.
30. Mensel C, Gundtoft PH, Brink O. Preoperative templating in orthopaedic fracture surgery: The past, present and future. *Injury.* 2022;53:S42-S46.
31. Athwal GS, Ellis RE, Small CF, Pichora DR. Computer-assisted distal radius osteotomy. *J Hand Surg Am.* 2003;28(6):951-958.
32. Jupiter JB, Ruder J, Roth DA. Computer-generated bone models in the planning of osteotomy of multidirectional distal radius malunions. *J Hand Surg Am.* 1992;17(3):406-415.
33. Athlani L, Chenel A, Berton P, Detammaecker R, Dautel G. Three-Dimensional Versus Radiographic Measurements for Analyzing Extra-Articular Distal Radius Malunion. *J Hand Surg Am.* 2020;45(10):984.e1-984.e7.
34. Totoki Y, Yoshii Y, Kusakabe T, Akita K, Ishii T. Screw Length Optimization of a Volar Locking Plate Using Three Dimensional Preoperative Planning in Distal Radius Fractures. *J Hand Surg Asian Pac* 2018;23(04):520-527.
35. Buijze GA, Leong NL, Stockmans F, et al. Three-Dimensional Compared with Two-Dimensional Preoperative Planning of Corrective Osteotomy for Extra-Articular Distal Radial Malunion. *Journal of Bone and Joint Surgery.* 2018;100(14):1191-1202.
36. Thomas TP, Anderson DD, Willis AR, Liu P, Marsh JL, Brown TD. ASB Clinical Biomechanics Award Paper 2010. *Clinical Biomechanics.* 2011;26(2):109-115.
37. Athlani L, Chenel A, Detammaecker R, De Almeida YK, Dautel G. Computer-assisted 3D preoperative planning of corrective osteotomy for extra-articular distal radius malunion: A 16-patient case series. *Hand Surg Rehabil.* 2020;39(4):275-283.
38. Hirsiger S, Schweizer A, Miyake J, Nagy L, Föhnstahl P. Corrective Osteotomies of Phalangeal and Metacarpal Malunions Using Patient-Specific Guides: CT-Based Evaluation of the Reduction Accuracy. *HAND.* 2018;13(6):627-636.
39. Schweizer A, Mauler F, Vlachopoulos L, Nagy L, Föhnstahl P. Computer-Assisted 3-Dimensional Reconstructions of Scaphoid Fractures and Nonunions With and Without the Use of Patient-Specific Guides: Early Clinical Outcomes and Postoperative Assessments of Reconstruction Accuracy. *J Hand Surg Am.* 2016;41(1):59-69.
40. Moolenaar JZ, Tümer N, Checa S. Computer-assisted preoperative planning of bone fracture fixation surgery: A state-of-the-art review. *Front Bioeng Biotechnol.* 2022;10.
41. Byrne AM, Impelmans B, Bertrand V, Van Haver A, Verstreken F. Corrective Osteotomy for Malunited Diaphyseal Forearm Fractures Using Preoperative 3-Dimensional Planning and Patient-Specific Surgical Guides and Implants. *J Hand Surg Am.* 2017;42(10):836.e1-836.e12.
42. Ratano S, Cioffi A. Treatment of scaphoid pseudarthrosis with partial and total 3d printed custom made prosthesis and reconstruction of interosseum scapholunate ligament: preliminary study. *Qeios.* Published online January 7, 2022.
43. Kim SJ, Jo YH, Choi WS, et al. Biomechanical Properties of 3-Dimensional Printed Volar Locking Distal Radius Plate: Comparison With Conventional Volar Locking Plate. *J Hand Surg Am.* 2017;42(9):747.e1-747.e6.
44. Pereira MF, Prahm C, Kolbenshlag J, Oliveira E, Rodrigues NF. Application of AR and VR in hand rehabilitation: A systematic review. *J Biomed Inform.* 2020;111:103584.

Datos de contacto del autor

Carlos Eduardo Torres Fuentes, MD
Correo electrónico: drtorresplatic@yahoo.com