

Original

Guías personalizadas impresas en 3D para la reparación de las roturas de la raíz posterior del menisco interno. Resultados preliminares

C. Martín-Hernández¹, A. Roche-Albero¹, M. Lizcano-Palomares¹, M. Durán-Serrano¹,
S. Lairla García², A. F. Laclériga-Giménez¹

¹ Servicio de Cirugía Ortopédica y Traumatología. Hospital Universitario Miguel Servet. Instituto de Investigación Sanitaria (IIS) de Aragón. Zaragoza

² Instituto de Investigación en Ortopedia Avanzada (Younext). Huesca

Correspondencia:

Dr. Carlos Martín-Hernández

Correo electrónico: cmartinh@salud.aragon.es

Recibido el 11 de marzo de 2021

Aceptado el 10 de julio de 2021

Disponible en Internet: septiembre de 2021

RESUMEN

Objetivo: comparar la funcionalidad de las guías personalizadas impresas en 3D versus las guías estándares comerciales al realizar la reparación de las roturas de la raíz posterior del menisco interno.

Métodos: estudio prospectivo observacional en el que se incluyeron 6 pacientes intervenidos artroscópicamente de una reparación de la raíz posterior del menisco interno de la rodilla, divididos en 2 grupos. En uno de ellos se empleó una guía comercial estandarizada y en el otro la guía personalizada impresa en 3D.

Resultados: no hubo diferencias significativas en el tiempo quirúrgico entre ambos grupos ($p > 0,05$). La media fue de 65 minutos en el grupo estándar (desviación estándar –DE–: 8) y de 63 minutos en el grupo de guías personalizadas (DE: 10). Las guías impresas en 3D se adaptaron en ambos apoyos a la superficie ósea de la tibia y mostraron precisión en la conducción de las agujas guía hacia la posición prevista. No hubo problemas derivados del rozamiento del metal de las agujas con el alma de la guía personalizada y el manejo resultó ergonómicamente satisfactorio para el cirujano.

Conclusiones: de los resultados preliminares obtenidos en este estudio, se puede concluir la viabilidad del diseño y la fabricación de guías personalizadas impresas en 3D para la reparación de las roturas de la raíz posterior del menisco interno, que permitieron realizar los túneles tibiales con precisión. Su empleo no consiguió disminuir el tiempo quirúrgico con respecto a las guías convencionales, aunque permitió una correcta adaptación

ABSTRACT

Customized 3D printed guides for the repair of rupture of the posterior root of the internal meniscus. Preliminary outcomes

Objective: to compare the performance of customized 3D printed guides versus standard commercial guides for the repair of rupture of the posterior root of the internal meniscus.

Methods: a prospective observational study was made of 6 patients subjected to arthroscopic repair of the posterior root of the internal meniscus of the knee. The patients were divided into two groups, with a standard commercial guide being used in one group and the customized 3D printed guide in the other.

Results: there were no significant differences in surgery time between the two groups ($p > 0.05$). The mean time was 65 minutes in the standard guide group (standard deviation –SD–: 8) versus 63 minutes in the customized guide group (SD: 10). The 3D printed guides adapted on both supports to the bone surface of the tibia and were precise in conducting the guide needles towards the planned position. There were no problems derived from friction between the metal of the needles and the bore of the customized guide, and handling was ergonomically satisfactory for the surgeon.

Conclusions: the preliminary findings of this study warrant the viability of the design and manufacture of customized 3D printed guides for the repair of rupture of the posterior root of the internal meniscus, which allowed precise preparation of the tibial tunnels. Their use did not shorten the surgery time versus the



<https://doi.org/10.24129/j.reaca.28373.fs2103011>

© 2021 Fundación Española de Artroscopia. Publicado por Imaidea Interactiva en FONDOSCIENCE® (www.fondoscience.com). Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (www.creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

a la anatomía de los pacientes y una ergonomía satisfactoria para el cirujano.

Nivel de evidencia: nivel 2. Estudio prospectivo de cohortes.

Relevancia clínica: el empleo de guías impresas en 3D permite una cirugía personalizada para la reinserción de la raíz posterior del menisco interno.

Palabras clave: Fabricación aditiva. Guía quirúrgica específica para el paciente. Impresión médica en 3D. Rotura de la raíz posterior del menisco.

conventional guides, though they allowed correct adaptation to the patient anatomy, and handling was ergonomically satisfactory for the surgeon.

Level of evidence: level 2. Prospective cohort study.

Clinical relevance: The use of 3D printed guides allows customized surgery for reinsertion of the posterior root of the internal meniscus.

Key words: Additive manufacture. Patient-specific surgical guide. Medical 3D printing. Rupture of the posterior root of the meniscus.

Introducción

Las roturas de la raíz posterior del menisco se definen como la avulsión, con o sin fragmento óseo, o la rotura radial en una localización distante hasta un centímetro de su inserción⁽¹⁾. Descritas en 1991 por Pagnani *et al.*⁽²⁾, se han diferenciado 2 tipos en cuanto a su etiología: la desinserción aguda, traumática, que afecta al ligamento insercional del menisco con la tibia, poco frecuente y típica de pacientes jóvenes, y otra más común, degenerativa, que aparece en el contexto de lesiones artrósicas y en una porción del menisco más alejada de la inserción, que deja por lo tanto un muñón posterior⁽³⁾.

Mecánicamente, originan una alteración similar a la de una meniscectomía total⁽⁴⁾ y también son una causa potencial de inestabilidad de rodilla, condicionando una rápida evolución hacia la artrosis en el compartimento afecto. Su reparación restablece la función de transmisión de cargas del menisco⁽⁵⁻⁹⁾. Si bien se han empleado el tratamiento conservador y la meniscectomía parcial con buenos resultados clínicos a corto plazo⁽¹⁰⁾, la reparación y la reinserción de la raíz en su lugar original constituyen actualmente la técnica de elección.

El método de reparación puede diferir ligeramente dependiendo del tipo de patrón de desgarro de la raíz. Las técnicas quirúrgicas de reinserción se dividen en 2 categorías amplias: reparaciones mediante suturas transóseas y reparaciones mediante anclajes con sutura. Las técnicas transóseas consisten en pasar suturas a través de la raíz del menisco, recuperándolas a través de túneles perforados en la tibia proximal y posteriormente atarlas sobre un poste, botón o un puente óseo sobre la superficie anterior de la tibia⁽¹¹⁻¹⁴⁾. Se han propuesto configuraciones con diferentes propiedades biomecánicas; sin embargo, la de 2 suturas simples ha mostrado como resultado un menor desplazamiento de la raíz y mayor rigidez que conformaciones más complejas⁽¹⁵⁾. En cuanto a los túneles, se han descrito técnicas de túnel único y doble; estas últimas con la finalidad de reproducir mejor la huella anatómica⁽¹⁶⁾.

Las técnicas de sutura transósea precisan de guías para la realización de túneles tibiales a través de los que

reinsertar la raíz. Existen varias de estas guías de bajo perfil en el mercado que están adaptadas a la lateralidad de la rodilla, derecha o izquierda, y al menisco, interno o externo. Pese a esta adaptación, permiten una variación en la angulación del túnel pero no en la morfología del brazo intraarticular de cada una de ellas, hecho que puede generar conflictos con la anatomía de determinados pacientes con surcos estrechos o espinas prominentes.

La impresión en 3 dimensiones (3D) se ha empleado en cirugía de rodilla para el diseño de guías personalizadas para osteotomía⁽¹⁷⁾ y artroplastia⁽¹⁸⁾, e incluso para el posicionamiento anatómico del túnel femoral en la cirugía de reconstrucción del ligamento cruzado anterior (LCA)⁽¹⁹⁾; sin embargo, no hemos encontrado en la bibliografía ninguna aplicación para la cirugía del menisco.

El objeto de este trabajo es comparar el tiempo quirúrgico, la fiabilidad y la facilidad de uso de guías personalizadas impresas en 3D para la reparación, mediante túneles transóseos, de las roturas de la raíz posterior del menisco, adaptadas a las características anatómicas de cada paciente, con los de las guías estandarizadas con la hipótesis de que las primeras serían al menos igual de fiables y ergonómicas, y proporcionarían un menor tiempo de cirugía.

Material y método

Se trata de un estudio prospectivo observacional de 6 pacientes intervenidos consecutivamente durante 2020 en nuestro centro por rotura de la raíz posterior del menisco interno de tipo 1 y 2 según la clasificación de LaPrade⁽²⁰⁾, divididos en 2 grupos de 3. Todos los pacientes fueron intervenidos por el mismo cirujano y, siguiendo una sucesión alternada, se adjudicaron a uno u otro grupo. En uno de ellos se empleó la guía para sutura con doble túnel de Smith & Nephew (Smith & Nephew, Inc., Massachusetts, USA) y en el otro la guía personalizada impresa en 3D. Todos los pacientes habían sido diagnosticados previamente mediante imagen de resonancia nuclear magnética (RNM) y cumplían con las indicaciones para la reparación

artroscópica transtibial (rodilla normoeje, cartílago normal o con lesiones de Outerbridge de grado I o II, y de Kellgren-Lawrence de grados 0 a II). Como criterios de exclusión, se rechazaron para el estudio aquellos pacientes que presentaban lesiones asociadas ligamentosas o condrales que precisasen procedimientos asociados de reparación.

En ambos grupos hubo 2 rodillas derechas y 1 izquierda. En el grupo de las guías estándar la media de edad de los pacientes fue de 41 años, con una desviación estándar (DE) de 3 años; todos ellos fueron hombres. En el grupo de las guías personalizadas hubo 2 hombres y 1 mujer, y la edad media fue de 38 años (DE: 5 años). No se observaron diferencias significativas de edad o lateralidad entre grupos.

Este estudio recibió la aprobación del Comité Autonomo de Ética en Investigación Médica y se obtuvo el consentimiento informado por escrito de todos los pacientes.

Para la manufactura de las guías se realizó la reconstrucción virtual de la articulación mediante el programa MITK (Medical Imaging Interaction Toolkit), un proyecto de *software* de código abierto gratuito para el desarrollo de aplicaciones de procesamiento de imágenes médicas elaborado por la División de Informática Médica y Biológica (MBI) del German Cancer Research Center. Como fuente de imágenes se emplearon los ficheros DICOM (Digital Imaging and Communication On Medicine) de los cortes transversal, sagital y coronal de 1 mm de la RNM de cada paciente realizada en un aparato de alto campo Siemens de 1,5 T.

Con el programa Rhinoceros®, Rhino 6 (TLM, Inc.), se diseñó cada guía de forma genérica para después adaptarla a la reconstrucción virtual de la rodilla de cada paciente con un área de entrada en la cortical anteromedial de la tibia en una posición medial a la tuberosidad tibial anterior (TTA) que se adaptaba al relieve óseo y 2 puntos

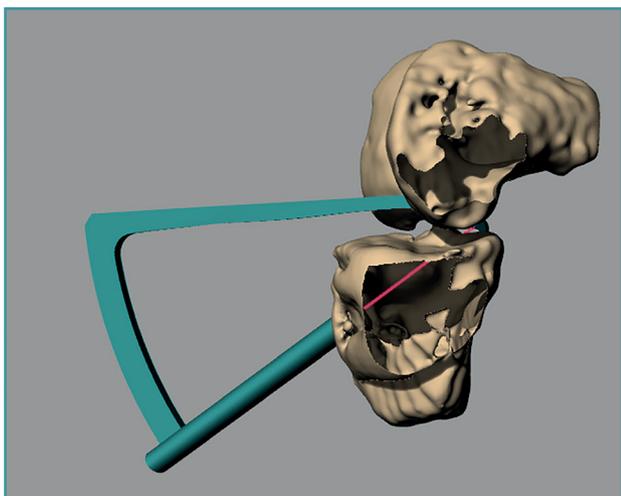


Figura 1. Diseño de la guía sobre la reconstrucción virtual de la rodilla.

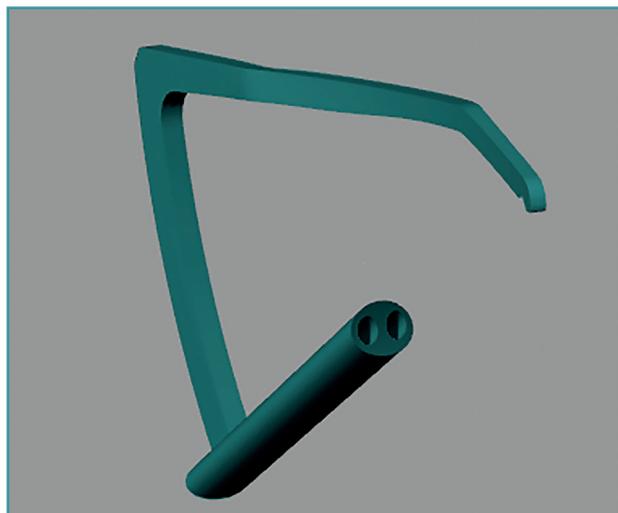


Figura 2. Diseño definitivo con 2 ánimas de 3 mm.

de salida en la zona de inserción del cuerno posterior del menisco interno (Figura 1). Cada guía contaba con 2 ánimas de 3 mm para la creación de 2 túneles paralelos (Figura 2). La angulación establecida de los túneles fue de 60° en todos los casos, variándose en cada caso la morfología de la porción intraarticular de la guía para adaptarla al 100% a la anatomía y evitar el choque con las espinas tibiales o el cóndilo femoral medial.

La imagen virtual de cada una de las rodillas fue impresa para crear una biorréplica en 3D de la articulación empleando una impresora 3D Zortrax® M200 y, como ma-

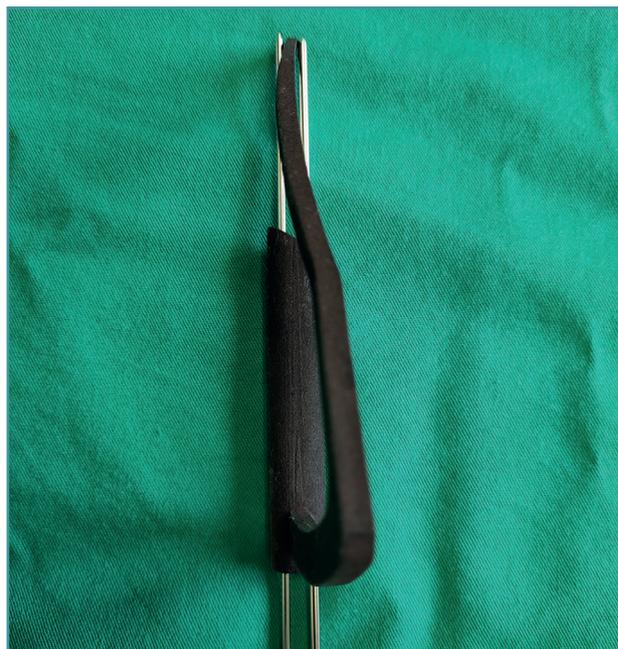


Figura 3. Guía impresa.



Figura 4. La impresión de la biorréplica permite realizar una cirugía virtual para evaluar la posición de los túneles.

terial, el poliestireno de alto impacto (HIPS). Cada una de las guías fue manufacturada empleando poliamida, material esterilizable en caliente, y una impresora HP® Jet Fusion 4210 (Figura 3). Las biorréplicas permitieron realizar cirugías virtuales para comprobar la exactitud de las guías (Figura 4).

La técnica quirúrgica fue realizada colocando al paciente en decúbito supino, tras anestesia regional intra-



Figura 5. Adaptación de la guía en el campo quirúrgico.

dural, con la rodilla libre sobre la mesa operatoria, tope lateral e isquemia con manguito neumático.

Se emplearon portales anteromedial y anterolateral estándar. Una vez identificada la rotura, se procedió a preparar el lecho de la raíz meniscal con una fresa artroscópica retirando el cartílago y dejando una base ósea cruenta. Empleando las guías correspondientes (Figura 5), se realizaron 2 túneles de 2,8 mm para pasar 2 suturas FiberStick® (Arthrex, Inc., Naples, Florida, USA) n.º 2 a través de uno de ellos y, una vez suturado el menisco mediante configuración de 2 puntadas simples con un pasador FirstPass® (Smith & Nephew, Inc., Massachusetts, USA), se recuperaron a través del otro túnel y se anudaron sobre sí mismas en la cortical anterior de la tibia.

Para el estudio estadístico se realizó la comparación de medias con la prueba t de Student para datos independientes.

Resultados

En todos los casos se consiguió la reinserción de la raíz meniscal. No hubo diferencias significativas en el tiempo quirúrgico entre ambos grupos ($p > 0,05$). La media fue de 65 minutos en el grupo estándar (DE: 8) y de 63 minutos en el grupo de guías personalizadas (DE: 10).

En uno de los pacientes intervenidos con guía estándar fue necesario modificar la perforación debido a la salida intraarticular de la aguja de Kirschner en un locus



Figura 6. Visión desde el portal anterolateral del posicionamiento intraarticular de la guía y salida intraarticular de los túneles en la huella de la raíz posterior del menisco interno de una rodilla derecha.

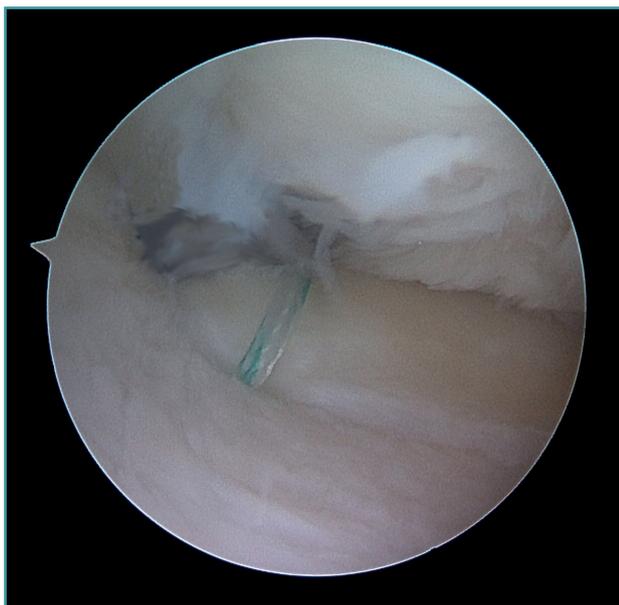


Figura 7. Reparación final (rodilla derecha).

distinto al planificado como consecuencia de la dificultad de posicionamiento condicionada por la existencia de un surco intercondíleo estrecho y unas espinas prominentes. Las guías impresas en 3D se adaptaron en ambos apoyos a la superficie ósea de la tibia y mostraron precisión en la conducción de las agujas guía hacia la posición prevista (Figuras 6 y 7). No hubo problemas derivados del rozamiento del metal de las agujas con el alma de la guía personalizada y el manejo resultó ergonómicamente satisfactorio para el cirujano.

Discusión

Este trabajo muestra que la utilización de guías personalizadas para la reparación de las roturas de la raíz posterior del menisco interno, fabricadas mediante impresión en 3D, no mejora el tiempo quirúrgico con respecto a las guías comerciales estándar y, por tanto, no cumple la hipótesis propuesta. Las guías personalizadas permitieron una correcta adaptación a la anatomía del paciente.

La mayoría de las casas comerciales disponen de instrumentales con guías para la realización de la sutura y del túnel o túneles tibiales. A pesar de facilitar los procedimientos de reparación y reducir el tiempo operatorio, los dispositivos de guía de reparación meniscal no están disponibles en todas las circunstancias o registrados para su uso en todos los países de todo el mundo. Además, pueden ser costosos y, debido a su diseño estándar, aunque modular, pueden resultar en ocasiones de utilización incómoda o imprecisa en presencia de variaciones anatómicas de la tibia y del fémur. Por lo tanto, es necesario

plantear soluciones alternativas de bajo coste y personalizadas para el tratamiento de estas lesiones.

Una posibilidad para simplificar el proceso es el diseño de guías desechables personalizadas mediante impresión en 3D. La mayor ventaja que ofrecen las impresoras 3D en aplicaciones médicas es la libertad de producir productos personalizados⁽²¹⁾, plantillas y accesorios hechos a medida para su uso en operaciones, implantes, accesorios y herramientas quirúrgicas que pueden ofrecer un gran valor tanto para pacientes como para médicos⁽²²⁾.

La tecnología de fabricación aditiva solía ser lenta y costosa⁽²³⁾; sin embargo, la proliferación en el mercado y el progresivo abaratamiento de las impresoras en 3D han facilitado su accesibilidad. Un beneficio importante que ofrece la impresión en 3D es la capacidad para producir artículos a bajo precio. Los métodos de fabricación tradicionales siguen siendo menos costosos para la producción a gran escala; sin embargo, el costo de la impresión en 3D es cada vez más competitivo para tiradas de producción pequeñas. Del mismo modo, tanto la velocidad como el *software* y los materiales utilizados se están continuamente optimizando, por lo que la impresión en 3D de materiales quirúrgicos es en la actualidad una posibilidad realista.

El uso de la impresión en 3D para producir instrumentos de un solo uso ofrece una oportunidad para explorar nuevos diseños, que pueden cambiar completamente de paciente a paciente, racionalizando los pasos en el procedimiento.

Esta aproximación ha sido empleada para fabricar implantes dentales, espinales y de cadera⁽²¹⁾. En cirugía abierta de rodilla se han manufacturado biorréplicas o modelos anatómicos para el tratamiento de fracturas⁽²⁴⁾, guías para osteotomía⁽¹⁷⁾, artroplastia⁽¹⁸⁾ e incluso implantes protésicos^(25,26). Las guías quirúrgicas son la aplicación médica más popular de la impresión en 3D⁽²⁷⁾. En artroscopia se ha utilizado para desarrollar guías para el posicionamiento anatómico del túnel femoral en la cirugía de reconstrucción del LCA⁽¹⁹⁾; sin embargo, no hemos encontrado en la bibliografía ninguna aplicación para la cirugía del menisco.

Las ventajas reportadas de las guías quirúrgicas específicas para el paciente incluyen una reducción en tiempos quirúrgicos y una mejora en la precisión de las intervenciones, debido a la personalización⁽²⁸⁾. En nuestro trabajo, las guías impresas no permitieron disminuir significativamente el tiempo quirúrgico, pero se mostraron como una herramienta precisa y, sobre todo, se adaptaron perfectamente a la morfología de cada uno de los pacientes intervenidos. La precisión de la guía es un factor importante para su incorporación generalizada a las cirugías. En una revisión sistemática de las técnicas de impresión en 3D en el área médica, Tack *et al.*⁽²⁷⁾ reportaron hasta un 30% de modelos que resultaron con precisión media o insuficiente.

En nuestro estudio, la apertura del túnel tibial resultó finalmente ubicada en una posición favorable en ambos grupos; sin embargo, en uno de los casos en los que se emplearon guías convencionales, se produjo un conflicto de espacio cóndilo-espaldas que originó una posición forzada de la guía y una salida de la aguja de Kirschner en un punto distinto al planificado, lo que obligó a recolocarla y rehacer la perforación.

La personalización de la guía y su adaptación a la anatomía de cada paciente constituyen una evidente ventaja, sobre todo en aquellos casos con alteraciones morfológicas de la articulación. Permitirá una planificación preoperatoria y su uso en combinación con otras guías personalizadas para evitar el cruce de túneles en cirugías más complejas con lesiones multiligamentosas asociadas.

Las guías fueron fáciles de producir, con un tiempo total de diseño e impresión de 24 horas y un coste de 8 euros de la poliamida.

El protocolo de RNM modificado con cortes de 1 mm fue necesario para obtener una biorréplica que garantizase la precisión deseada y supuso 10 minutos adicionales de tiempo de exploración. Serán necesarios estudios ulteriores para valorar si es factible la producción basada en resonancias de menos resolución o con menor número de cortes.

Después de la esterilización, estas guías quirúrgicas pueden ser utilizadas intraoperatoriamente en cualquier hospital y pueden reducir los costes de adquisición de instrumental en aquellos casos en los que las casas comerciales no las proporcionen con sus implantes. Por otra parte, permiten no solo su adaptación a la anatomía del paciente, sino también una modificación ergonómica adaptable a cada cirujano, además de la disminución de su peso con respecto a los instrumentos metálicos⁽²⁹⁾.

Las limitaciones de este estudio preliminar incluyen un número bajo de casos, que condiciona una baja potencia estadística, y la no evaluación de otras impresoras o materiales imprimibles que pudieran mejorar la accesibilidad o el coste de fabricación de las guías. Finalmente, no se ha realizado un estudio coste/beneficio de las guías personalizadas.

Conclusiones

Este trabajo ha demostrado la viabilidad del diseño y la fabricación de guías personalizadas impresas en 3D para la reparación de las roturas de la raíz posterior del menisco interno, que permitieron realizar los túneles tibiales con precisión.

Su empleo no consiguió disminuir el tiempo quirúrgico con respecto a las guías convencionales, aunque permitió una correcta adaptación a la anatomía de los pacientes y una ergonomía satisfactoria para el cirujano.

Financiación y agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado con financiación proporcionada por la ayuda a proyectos de investigación de la Fundación Española de Artroscopia en 2019.

Responsabilidades éticas

Conflicto de interés. Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

Financiación. Este trabajo ha sido financiado con la ayuda a proyectos de investigación de la Fundación Española de Artroscopia en 2019.

Protección de personas y animales. Los autores declaran que para esta investigación no se han realizado experimentos en seres humanos ni en animales.

Confidencialidad de los datos. Los autores declaran que han seguido los protocolos de su centro de trabajo sobre la publicación de datos de pacientes y que todos los pacientes incluidos en el estudio han recibido información suficiente y han dado su consentimiento informado por escrito para participar en dicho estudio.

Derecho a la privacidad y consentimiento informado. Los autores declaran que en este artículo no aparecen datos de pacientes.

Bibliografía

1. Koenig JH, Ranawat AS, Umans HR, Difelice GS. Meniscal root tears: diagnosis and treatment. *Arthroscopy*. 2009;25(9):1025-32.
2. Pagnani MJ, Cooper DE, Warren RF. Extrusion of the medial meniscus. *Arthroscopy*. 1991;7(3):297-300.
3. Ro KH, Kim JH, Heo JW, Lee DH. Clinical and Radiological Outcomes of Meniscal Repair Versus Partial Meniscectomy for Medial Meniscus Root Tears: A Systematic Review and Meta-analysis. *Orthop J Sports Med*. 2020;8(11):2325967120962078.
4. Allaire R, Muriuki M, Gilbertson L, Harner CD. Biomechanical consequences of a tear of the posterior root of the medial meniscus. Similar to total meniscectomy. *J Bone Joint Surg Am*. 2008;90(9):1922-31.
5. Choi CJ, Choi YJ, Lee JJ, Choi CH. Magnetic resonance imaging evidence of meniscal extrusion in medial meniscus posterior root tear. *Arthroscopy*. 2010;26(12):1602-6.
6. LaPrade CM, Jansson KS, Dornan G, Smith SD, Wijdicks CA, LaPrade RF. Altered tibiofemoral contact mechanics due to lateral meniscus posterior horn root avulsions and radial tears can be restored with in situ pull-out suture repairs. *J Bone Joint Surg Am*. 2014;96(6):471-9.
7. Padalecki JR, Jansson KS, Smith SD, et al. Biomechanical consequences of a complete radial tear adjacent to the medial meniscus posterior root attachment site: in situ pull-out repair restores derangement of joint mechanics. *Am J Sports Med*. 2014;42(3):699-707.

8. Marzo JM, Gurske-DePerio J. Effects of medial meniscus posterior horn avulsion and repair on tibiofemoral contact area and peak contact pressure with clinical implications. *Am J Sports Med.* 2009;37(1):124-9.
9. Harner CD, Mauro CS, Lesniak BP, Romanowski JR. Biomechanical consequences of a tear of the posterior root of the medial meniscus. *Surgical technique. J Bone Joint Surg Am.* 2009;91 Suppl 2:257-70.
10. LaPrade RF, Arendt EA, Getgood A, Faucett SC. *The menisci.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2017
11. Kim YM, Rhee KJ, Lee JK, Hwang DS, Yang JY, Kim SJ. Arthroscopic pullout repair of a complete radial tear of the tibial attachment site of the medial meniscus posterior horn. *Arthroscopy.* 2006;22(7):795.e1-4.
12. Raustol OA, Poelstra KA, Chhabra A, Diduch DR. The meniscal ossicle revisited: etiology and an arthroscopic technique for treatment. *Arthroscopy.* 2006; 22(6):687.e1-3.
13. Ahn JH, Wang JH, Yoo JC, Noh HK, Park JH. A pull out suture for transection of the posterior horn of the medial meniscus: using a posterior trans-septal portal. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2007;15(12):1510-3.
14. Nicholas SJ, Golant A, Schachter AK, Lee SJ. A new surgical technique for arthroscopic repair of the meniscus root tear. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2009;17(12):1433-6.
15. Cerminara AJ, LaPrade CM, Smith SD, Ellman MB, Wijdicks CA, LaPrade RF. Biomechanical evaluation of a transtibial pull-out meniscal root repair: challenging the bungee effect. *Am J Sports Med.* 2014; 42(12):2988-95.
16. LaPrade CM, LaPrade MD, Turnbull TL, Wijdicks CA, LaPrade RF. Biomechanical evaluation of the transtibial pull-out technique for posterior medial meniscal root repairs using 1 and 2 transtibial bone tunnels. *Am J Sports Med.* 2015; 43(4):899-904.
17. Shen Z, Wang H, Duan Y, Wang J, Wang F. Application of 3D printed osteotomy guide plate-assisted total knee arthroplasty in treatment of valgus knee deformity. *J Orthop Surg Res.* 2019;14(1):327.
18. Hooper J, Schwarzkopf R, Fernandez E, et al. Feasibility of single-use 3D-printed instruments for total knee arthroplasty. *Bone Joint J.* 2019;101-B(7_Supple_C):115-20.
19. Rankin I, Rehman H, Frame M. 3D-Printed Patient-Specific ACL Femoral Tunnel Guide from MRI. *Open Orthop J.* 2018;12:59-68.
20. LaPrade CM, James EW, Cram TR, Feagin JA, Engebretsen L, LaPrade RF. Meniscal root tears: a classification system based on tear morphology. *Am J Sports Med.* 2015;43:363-9.
21. Mertz L. Dream it, design it, print it in 3-D: what can 3-D printing do for you? *IEEE Pulse.* 2013;4(6):15-21.
22. Banks J. Adding value in additive manufacturing: researchers in the United Kingdom and Europe look to 3D printing for customization. *IEEE Pulse.* 2013;4(6):22-6.
23. Ventola CL. *Medical Applications for 3D Printing: Current and Projected Uses.* P T. 2014;39(10):704-11.
24. Long ZS, Gong FP, Dong XP, Li JT. Clinical application of multiple 3D-printed guide plates for precise reduction and fixation of comminuted patellar fractures. *J Int Med Res.* 2020;48(11):300060520972088.
25. Remily EA, Dávila Castrodad IM, Mohamed NS, Wilkie WA, Kelemen MN, Delanois RE. Short-term Outcomes of 3D-Printed Titanium Metaphyseal Cones in Revision Total Knee Arthroplasty. *Orthopedics.* 2020;7:1-5.
26. Liu W, Shao Z, Rai S, et al. Three-dimensional-printed intercalary prosthesis for the reconstruction of large bone defect after joint-preserving tumor resection. *J Surg Oncol.* 2020;121(3):570-7.
27. Tack P, Victor J, Gemmel P, Annemans L. 3D-printing techniques in a medical setting: a systematic literature review. *Biomed Eng Online.* 2016 Oct;15(1):115.
28. Popescu D, Laptou D. Rapid prototyping for patient-specific surgical orthopaedics guides: a systematic literature review. *Proc Inst Mech Eng H.* 2016;230(6):495-515.
29. Andrés-Cano P, Calvo-Haro JA, Fillat-Gomà F, Andrés-Cano I, Perez-Mañanes R. Role of the orthopaedic surgeon in 3D printing: current applications and legal issues for a personalized medicine. *Rev Esp Cir Ortop Traumatol.* 2021;65(2):138-51.