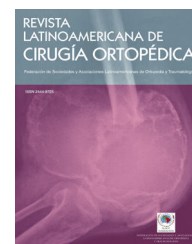




Revista latinoamericana de cirugía ortopédica

www.elsevier.es/rslaot



Original

Nuestra experiencia con impresión 3D doméstica en Cirugía Ortopédica y Traumatología. Hazlo tú mismo



Rubén Pérez-Mañanes^{a,b,*}, José Calvo-Haro^{a,b}, Juan Arnal-Burró^{a,b}, Francisco Chana-Rodríguez^{a,b}, Pablo Sanz-Ruiz^{a,b} y Javier Vaquero-Martín^{a,b}

^a Servicio de Cirugía Ortopédica y Traumatología, Hospital General Universitario Gregorio Marañón, Madrid, España

^b Departamento de Cirugía, Facultad de Medicina, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Recibido el 8 de junio de 2016

Aceptado el 17 de junio de 2016

On-line el 21 de julio de 2016

Palabras clave:

Impresión 3D

Planificación preoperatoria

Comunicación

Modelos

Guías quirúrgicas

R E S U M E N

La impresión 3D posibilita la traslación de una planificación virtual a modelos tangibles. El uso hospitalario de las impresoras 3D comercializadas para uso doméstico facilita la obtención de forma autónoma (*do it yourself*) de reproducciones realistas al mínimo coste.

Objetivo: Exponer nuestra metodología para la traslación clínica de la impresión 3D doméstica al campo de la Cirugía Ortopédica y Traumatología, definir sus indicaciones y aplicaciones específicas de acuerdo con la experiencia clínica.

Material y métodos: Estudio analítico observacional prospectivo de 63 casos intervenidos en nuestro servicio desde el año 2014, momento desde el que la impresión 3D doméstica está incluida en el proceso asistencial. Variables como el grado de satisfacción percibida por los pacientes, la precisión, el tiempo o la exposición a radiaciones ionizantes durante la intervención son analizadas.

Resultados: Se define un flujo de trabajo hasta la obtención del modelo impreso en 3D mediante el uso de programas de libre acceso e impresoras 3D domésticas, con una mejoría en todas las variables incluidas en el estudio.

Conclusiones: La impresión 3D doméstica tiene numerosas aplicaciones en Cirugía Ortopédica y Traumatología. La experiencia clínica ha permitido definir un flujo de trabajo con unos resultados clínicos satisfactorios.

© 2016 Federación de Sociedades y Asociaciones Latinoamericanas de Ortopedia y Traumatología. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: rubenperez.phd@gmail.com (R. Pérez-Mañanes).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.rslaot.2016.06.004>

2444-9725/© 2016 Federación de Sociedades y Asociaciones Latinoamericanas de Ortopedia y Traumatología. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Our experience with domestic 3D printing in Orthopedic Surgery and Traumatology. Do it yourself

A B S T R A C T

Keywords:
3D printing
Preoperative planning
Communication
Models
Surgical guides

3D printing allows translation of a virtual planning to tangible models. Domestic 3D printers in hospital facilitate obtaining autonomously («do it yourself») realistic reproductions at minimum cost.

Objective: To describe our methodology for clinical translation of domestic 3D printing in Orthopedic Surgery and Traumatology, define indications and specific applications according to clinical experience.

Materials and methods: A prospective observational analytical study of 63 patients treated in our service from 2014 in which domestic 3D printing is included in the care process. Variables such as degree of satisfaction perceived by patients, accuracy, time or exposure to ionizing radiation during surgery are analyzed.

Results: A workflow is defined to obtaining 3D printed model using freely available programs and domestic 3D printers, and variables included in the study improved.

Conclusions: Domestic 3D printing has numerous applications in Orthopedic Surgery and Traumatology. Clinical experience has allowed defining a workflow with satisfactory clinical results.

© 2016 Federación de Sociedades y Asociaciones Latinoamericanas de Ortopedia y Traumatología. Published by Elsevier España, S.L.U. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Introducción

La impresión 3D es una tecnología que está revolucionando el campo de la medicina y, como no podía ser de otra forma, tanto la Cirugía Ortopédica como la Traumatología no son ajenas a este progreso¹. En este contexto, el Emergency Care Research Institute situó el año pasado a la impresión 3D en el segundo puesto de las 10 tecnologías de mayor impacto sanitario² y la Food and Drug Administration de Estados Unidos ha publicado recomendaciones técnicas para su traslación clínica³.

Los avances en reconstrucción tridimensional de las imágenes radiológicas han permitido disponer de herramientas virtuales para la planificación quirúrgica, pero es la impresión 3D la que posibilita la traslación de una planificación virtual a modelos tangibles^{4,5}. Existen muchos tipos de impresión 3D, aunque son las aditivas, y especialmente el modelado por deposición fundida de material termoplástico (FDM: *fused deposition modeling*) el que está teniendo mejor acogida en el sector empresarial y doméstico. En los últimos años se han publicado revisiones de los métodos necesarios para su introducción en nuestro campo, así como ejemplos de las primeras aplicaciones y usos específicos⁶⁻⁹.

El uso hospitalario de las impresoras 3D comercializadas para uso doméstico permite abaratar de forma muy significativa el coste de esta tecnología, facilitando la obtención de forma autónoma (*do it yourself*) de reproducciones realistas al mínimo coste. La impresión en 3D de modelos anatómicos, generar instrumental o ayudas quirúrgicas impresas a medida y adaptadas a situaciones específicas, o facilitar el entrenamiento de personal médico mediante reproducciones personalizadas abre un horizonte de posibilidades al liberar al especialista de las restricciones que impone el catálogo

comercial, ya que puede proponer, fabricar, evaluar sus propias soluciones, y participar en líneas emergentes como la bioimpresión de tejidos y órganos o la manufactura de implantes a medida¹⁰⁻¹³. Entre los objetivos de este trabajo está no solo el exponer la metodología para la traslación clínica de la impresión 3D doméstica al campo de la Cirugía Ortopédica y Traumatología, sino también el definir sus indicaciones y aplicaciones específicas de acuerdo con la experiencia clínica.

Metodología con la impresión 3D doméstica en nuestro centro

En todos los casos se disponía de estudios radiológicos por lotes (tomografía computarizada [TC], resonancia magnética [RM]) solicitados para el diagnóstico, y previamente al inicio del proceso los pacientes fueron informados y firmaron el consentimiento informado. Mediante programas de acceso libre: OsiriX (<http://osirix-viewer.com>), Horos (<http://www.horosproject.org>), InVesalius (<http://svn.softwarepublico.gov.br/trac/invesalius>), 3Dslicer (<http://slicer.org>) MeVisLab (<http://www.mevislab.de/download/>), Meshmixer y 123D Design (Autodesk, Inc, EE. UU.) se realizó el procesamiento de las imágenes DICOM hasta conseguir la reconstrucción de una malla tridimensional. La obtención de la malla tridimensional permitió la edición y posterior impresión en material termoplástico, logrando un modelo exacto de la anatomía del paciente, así como, si el caso lo requería, diseño de instrumental para navegación o guías quirúrgicas para simulación e, incluso, para uso intraoperatorio.

Las impresoras 3D domésticas de tecnología FDM utilizadas han sido: DaVinci 1.0 (XYZPrinting), Witbox 2 (bq), Ultimaker Extended 2+ (Ultimaker); y los materiales acrilonitrilo

butadieno estireno (ABS) y ácido poliláctico (PLA). Este último es el más utilizado al ser biodegradable, proceder de recursos renovables como el maíz y sufrir menor retracción que el ABS. Entre las desventajas del PLA destacar la baja temperatura de deformidad (55 °C) que obliga a emplear métodos de esterilización específicos, como el óxido de etileno, para evitar alterar sus propiedades si se requiere su disponibilidad intraoperatoria.

Nuestras indicaciones y experiencia

Se realiza un estudio analítico observacional prospectivo de los casos clínicos intervenidos en nuestro servicio desde el año 2014, momento en el que la impresión 3D doméstica es incluida dentro del proceso asistencial. Esta metodología se ha aplicado hasta la fecha a un total de 63 casos: oncología ortopédica (18 casos), fracturas (15 casos), deformidades angulares-torsionales (12 casos), displasias acetabulares (6 casos), deformidades del raquis (5 casos), recambios protésicos (4 casos) y deformidad del antepié (2 casos). En todos los casos se utilizaron los modelos impresos en 3D de la localización anatómica como herramienta comunicativa, para planificación quirúrgica o incluso para el premoldeado de placas de osteosíntesis en el caso de las fracturas. Se diseñaron y utilizaron guías quirúrgicas para posicionamiento e introducción de sistemas de fijación en las deformidades del raquis, o realización de osteotomías multiplanares en deformidades angulares, torsionales y en los casos oncológicos. En el 27% de los casos oncológicos (5/18) además de utilización de guías, se utilizó la cirugía asistida por imagen, conocida generalmente como navegación quirúrgica, gracias a la posibilidad de diseño e impresión 3D del instrumental necesario para identificar el posicionamiento con un sistema de detección multicámara instalado en el quirófano (OptiTrack, Natural-Point Inc., EE. UU.).

Los modelos anatómicos, instrumental o guías que se utilizan nunca son implantados, sino que se esterilizan en el propio hospital para ser empleados en el entorno de quirófano. Son herramientas que complementan y ayudan durante la operación y luego se desechan (fig. 1).



Figura 1 – Modelos 3D de casos clínicos tratados en el centro.

Para el análisis de resultados se ha tenido en cuenta la variable calidad percibida por el paciente: se han incluido en las encuestas de satisfacción entregadas a los pacientes durante el ingreso 2 cuestiones referentes a la impresión 3D, en las que la escala numérica de 1 a 5 refleja de menor a mayor el grado de satisfacción: 1) aportación de los modelos 3D a la información recibida sobre su enfermedad, 2) aportación de los modelos 3D a la información recibida sobre su tratamiento. Otra variable tomada en cuenta es la precisión quirúrgica, con una valoración de la corrección objetivada en deformidades angulares, de la colocación de los sistemas de fijación en deformidades del raquis, o de la definición de márgenes de resección tumoral mediante guías quirúrgicas o sistemas de posicionamiento guiado por imagen en los procesos oncológicos. Otras variables consideradas han sido el tiempo quirúrgico, tras evaluación de los registros reflejados en las hojas de intervención, y la exposición a radiaciones ionizantes intraoperatorias del paciente y del personal de quirófano, mediante los dosímetros.

Resultados

Las cuestiones planteadas en las encuestas de satisfacción entregadas a los pacientes durante la hospitalización en todos los casos reflejaron un alto índice de satisfacción (fig. 2).

En cuanto a la precisión quirúrgica en las diferentes aplicaciones ya hemos publicado los resultados que avalan esta afirmación en el caso de las deformidades angulares en miembros inferiores¹⁴. En fracturas y en deformidades del raquis



Figura 2 – Modelos 3D como herramientas comunicativas. a) Fractura de escápula. Comunicación entre profesionales. b) Angiosarcoma pélvico. Comunicación médico-paciente.



Figura 3 – Planificación quirúrgica de osteosarcoma pélvico: resección y reconstrucción con aloinjerto. a) Reconstrucción 3D: estudio de imagen TC. b) Diseño de guías para osteotomías de resección. c) Piezas impresas en 3D. Premoldeado en material de síntesis.

se han publicado ejemplos de las primeras aplicaciones y usos específicos que defienden una mejoría en la precisión quirúrgica¹⁵⁻¹⁹. En el caso de la cirugía ortopédica oncológica, la posibilidad de impresión de los modelos, el diseño de guías para la realización de osteotomías multiplanares previa planificación de los márgenes de resección y la navegación quirúrgica han aumentado la precisión quirúrgica en los casos en los que se han utilizado^{7,20}.

La planificación preoperatoria como paso previo a la ejecución intraoperatoria es fundamental para el ahorro de tiempo quirúrgico. En todos los casos supuso un ahorro de tiempo quirúrgico únicamente con la inclusión del modelo 3D impreso en el proceso de planificación. Si añadimos la posibilidad de simular pasos de la intervención quirúrgica sobre la pieza impresa, como puede ser la disposición y conformación del material de osteosíntesis, el pretallado de injertos óseos, o la calibración y mensuración de implantes, e incluso el diseño de guías de posicionamiento quirúrgico para la realización de osteotomías multiplanares o la colocación de sistemas de fijación, el ahorro de tiempo quirúrgico es indudable (fig. 3). En técnicas regladas como las osteotomías periarticulares de la rodilla para corrección de deformidades angulares, la impresión 3D ha supuesto un ahorro de tiempo quirúrgico del 30% respecto a los métodos convencionales¹⁴ (fig. 4). En otros procesos como las deformidades complejas del raquis o la cirugía oncológica, en los que la particularidad de los casos dificulta la homogeneidad de las muestras, resulta difícil diseñar un estudio en el que no se tenga que tener en cuenta dicho sesgo, aunque en la experiencia clínica se identifican tiempos de

ahorro quirúrgico del 30%, similares a los publicados en las osteotomías (fig. 5).

En todos los casos se disponía de estudios de imagen por lotes convencionales (TC o RM), necesarios para la obtención de la malla tridimensional. Todos estos estudios habían sido realizados durante el proceso diagnóstico y no con el objetivo de obtener una malla tridimensional para planificación quirúrgica. Es importante destacar esto porque el considerar la realización de pruebas de imagen específicas para planificación y no solo para diagnóstico exige la optimización de los procesos para obtención de imagen y, así, en el caso de pruebas como la TC se podrán realizar estudios específicos con dosis de radiación muy inferiores a las actualmente empleadas para el proceso diagnóstico. Gracias a la impresión tridimensional de los modelos y a la posibilidad de control de posicionamiento con la ayuda de guías quirúrgicas o sistemas de guiado de imagen se ha reducido la necesidad del uso de radioscopia intraoperatoria a situaciones puntuales¹⁴ (fig. 6).

Obstáculos y futuro de la impresión 3D

El avance tecnológico en imagen médica, la posibilidad de obtención de mallas tridimensionales de localizaciones anatómicas concretas a partir de los estudios por lotes convencionales como la TC o la RM, el diseño de instrumental o guías específicas adaptadas a cada caso y la posibilidad de la impresión tridimensional implica un auténtico cambio de paradigma en la planificación y ejecución quirúrgica²¹⁻²³. En localizaciones anatómicas complejas, como en el esqueleto

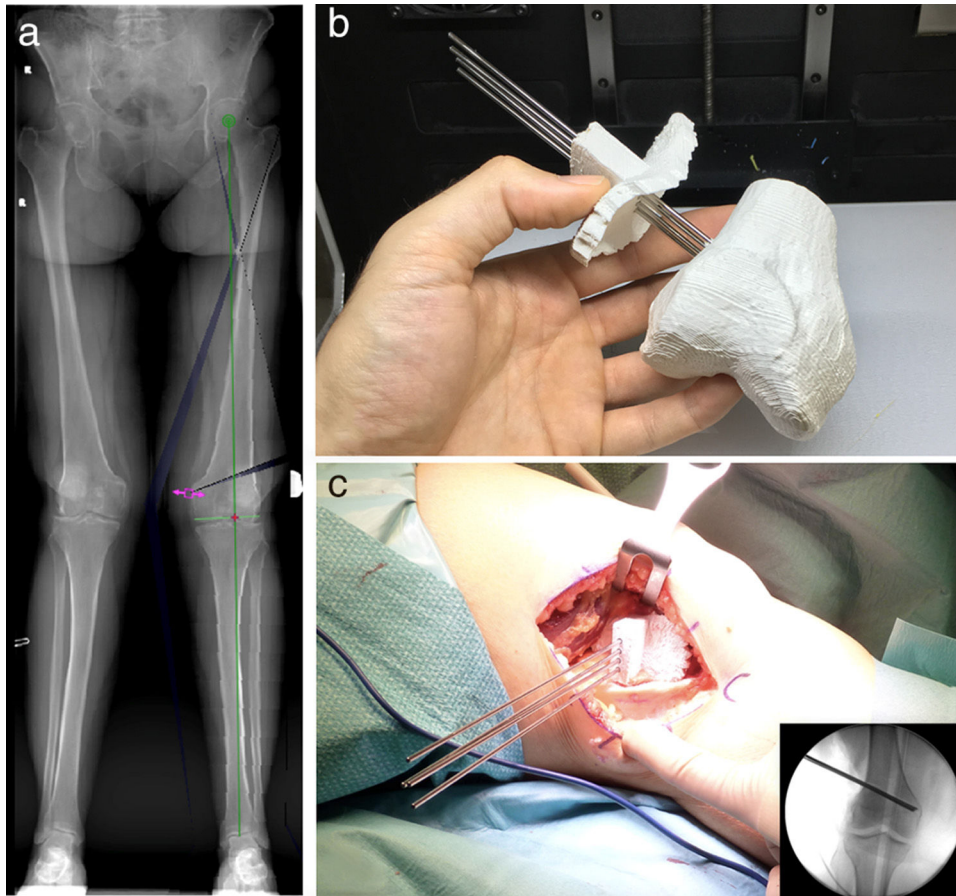


Figura 4 – Osteotomía varizante de fémur izquierdo. Flujo de trabajo. a) Planificación. b) Simulación. c) Ejecución.

axial, o en fracturas articulares en las que la reconstrucción de la superficie articular es crucial para el pronóstico de la lesión, que el profesional disponga de un modelo que reproduzca fielmente la anatomía de esta localización supone una herramienta visual y táctil, didáctica y eficaz.

A pesar de las potenciales ventajas, se han identificado varios inconvenientes para la integración de la impresión 3D como herramienta dentro del proceso asistencial como es el desconocimiento de las posibilidades de traslación clínica de la tecnología existente comercializada para uso doméstico por la falta de formación en nuevas tecnologías de los profesionales sanitarios implicados en el proceso. También el exceso de oferta tecnológica para aplicaciones clínicas concretas, y no tanto para la práctica clínica habitual, y el coste de los programas de posprocesado de imagen para la obtención de la malla tridimensional y de las impresiones 3D de los modelos, guías o instrumentales específicos. No podemos olvidar la inexistencia de un marco regulatorio específico para la impresión 3D médica.

Gracias al empleo de herramientas digitales gratuitas, programas de libre acceso con licencias tipo GNU/GPL y estructura *open-source*, y al uso de las impresoras 3D comercializadas para uso doméstico y dirigidas al público general se puede abaratar de forma muy significativa el coste de esta tecnología, que es prácticamente despreciable si se compara con el coste de la impresión 3D convencional, en la que una

empresa independiente asume el posprocesado, elaboración de la malla tridimensional, diseño de las guías e impresión de los modelos requeridos. La realización de esos modelos implica enviar la información del paciente unas semanas antes de realizar la cirugía para poder crear las plantillas en otro centro a través de una empresa independiente, margen de tiempo del cual no se dispone en numerosas ocasiones.

Las impresoras 3D domésticas tienen un coste que oscila entre 600 y 1.500 € y permiten obtener modelos de muy buena resolución (0,4-01 mm por capa) con un coste por material plástico muy reducido. Una bobina de 1 kg de filamento de PLA o de ABS, los 2 termoplásticos más comúnmente empleados, se adquieren por un precio inferior a los 20 €. Con esta cantidad de material se pueden imprimir de 5 a 10 modelos médicos a tamaño real. Así, la impresión de un modelo médico en 3D supone un precio de producción muy bajo, lo que permite su implantación en los centros sanitarios sin apenas repercusión en el coste asistencial.

Con los resultados obtenidos, se objetiva que la mejora en cuanto a la calidad percibida por el paciente es incuestionable. Cuando se le muestra su afección representada en 3D, el paciente manifiesta sorpresa a la par que desahogo, pues por fin entiende la descripción anatómica de su problema y la dimensión del pronóstico de su lesión o enfermedad. Pero, sobre todo, cuando esa reconstrucción 3D se imprime, es cuando conseguimos pasar de lo virtual a lo tangible, y el

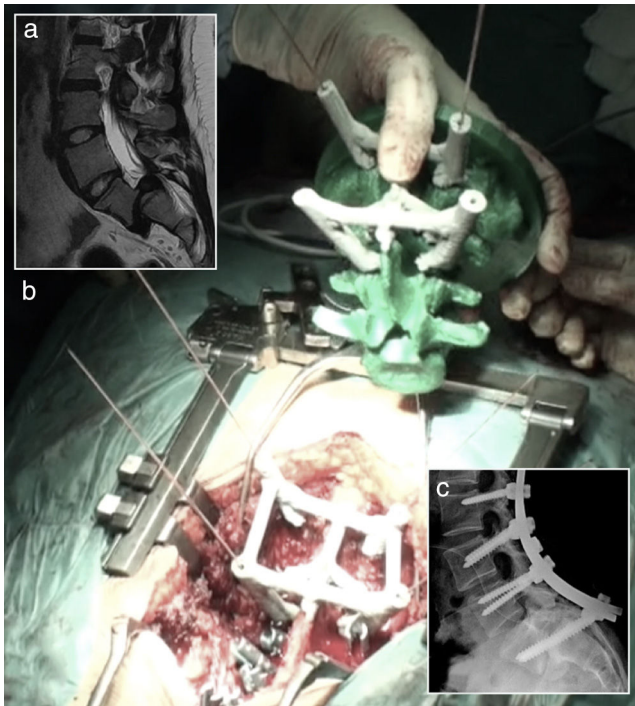


Figura 5 – Guías de posicionamiento para introducción de tornillos pediculares en espondilolistesis. a) Imagen preoperatoria. b) Intervención quirúrgica. c) Imagen postoperatoria.

paciente puede hacerse una idea lo más próxima a la realidad tanto del diagnóstico como de las opciones terapéuticas que se le pueden proponer.

La filosofía «hágalo usted mismo» (*do it yourself*) en manos de los profesionales sanitarios implicados encuentra en esta tecnología un aliado en su actividad asistencial. La formación en programas de procesamiento de imagen y en impresión 3D posibilita el uso de herramientas digitales convencionales (*bring your own device*) como instrumentos eficaces para la planificación y diseño, y permite, además de un importante ahorro de costes, la preparación en muy poco tiempo del

material 3D requerido para la intervención. Esto ha permitido identificar varias aplicaciones de la impresión 3D doméstica con traslación clínica directa a la realidad asistencial: 1) planificación terapéutica, gracias a los nuevos métodos digitales para convertir lo virtual en tangible, 2) diseño-ingenería inversa para la fabricación de productos personalizados según necesidades específicas, 3) simulación médica con modelos anatómicos impresos en 3D para entrenamiento, 4) ejecución terapéutica con la fabricación de herramientas y ayudas de precisión para uso terapéutico personalizado, 5) comunicación médico-paciente y entre profesionales con la impresión tridimensional de modelos específicos y 6) formación de los profesionales sanitarios con la impresión de localizaciones anatómicas concretas o instrumentales específicos.

A pesar de todo lo anteriormente comentado, y aunque parece existir un consenso internacional en cuanto a que la impresión 3D está cambiando los cuidados de la salud, no existe un marco regulatorio específico para la impresión 3D médica. Varios organismos regulatorios en algunos países ya han planteado esta cuestión y las legislaciones de productos sanitarios se adaptarán próximamente a esta nueva revolución tecnológica³.

El empleo de las impresoras 3D comercializadas para uso doméstico y dirigidas al público general abarata de forma muy significativa el coste de esta tecnología y ofrece a los especialistas proponer, fabricar y evaluar sus propias soluciones. Será la experiencia clínica de los profesionales implicados y la formación en el uso de herramientas digitales lo que permita identificar la necesidad y la traslación a la realidad asistencial. Supone un auténtico cambio, en el que el cirujano ortopédico dedica más tiempo a la etapa preoperatoria lo que, a su vez, permite mejorar la calidad percibida en los pacientes y profesionales sanitarios, reproducir intraoperatoriamente los pasos planificados, mejorar la precisión, reducir la exposición a radiación ionizante intraoperatoria o reducir la duración de la intervención. Al acortar la cirugía se reducen, además, las tasas de complicaciones como la probabilidad de infecciones quirúrgicas, mejoras todas ellas que redundan en beneficio del paciente.

La impresión 3D aplicada al campo de la Cirugía Ortopédica y Traumatología es una tecnología que precisa

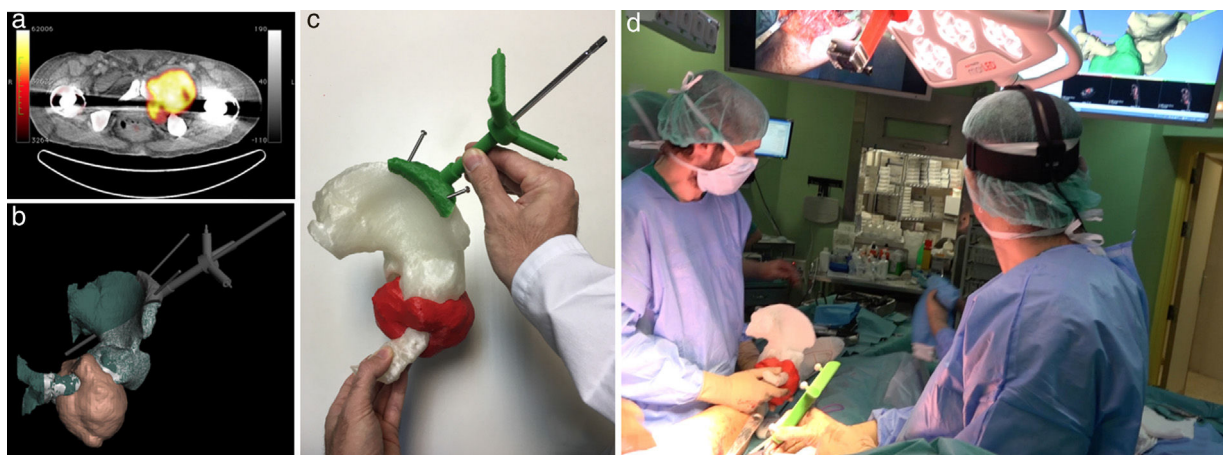


Figura 6 – Navegación quirúrgica en angiosarcoma pélvico. a) Estudio PET-TC preoperatorio. b) Planificación y diseño de instrumental de posicionamiento. c) Simulación sobre piezas impresas. d) Intervención quirúrgica.

imperativamente de la participación activa del profesional en las áreas de fabricación de escritorio, bioimpresión y manufactura de implantes a medida, con lo que se contribuye al cambio de paradigma en la medicina de precisión y en la cirugía personalizada. Se hace imprescindible el planteamiento y desarrollo de estudios multicéntricos específicos y de documentos de consenso para el desarrollo del adecuado marco regulatorio en torno a esta tecnología en nuestra especialidad.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

BIBLIOGRAFÍA

- Fadero PE, Shah M. Three dimensional (3D) modelling and surgical planning in trauma and orthopaedics. *Surgeon*. 2014;12:328-33.
- Top 10 healthcare technology issues for 2015. Emergency Care Research Institute 2015 [actualizado 1 Dic 2015; consultado 13 Jun 2016]. Disponible en: <https://www.ecri.org/press/Pages/Google-Glass-3-D-printing-ECRI-Institute-Top-10-Healthcare-Technology-2015.aspx>.
- Technical considerations for additive manufactured devices. U.S. Department of Health and Human Services. Food and Drug Administration; 2016 [consultado 13 Jun 16]. Disponible en: <http://www.fda.gov/downloads/MedicalDevices/DeviceRegulationandGuidance/GuidanceDocuments/UCM499809.pdf>.
- Huottilainen E, Paloheimo M, Salmi M, Paloheimo KS, Bjorkstrand R, Tuomi J, et al. Imaging requirements for medical applications of additive manufacturing. *Acta Radiol*. 2014;55:78-85.
- Guitton TG, Ring D. Three-dimensional computed tomographic imaging and modeling in the upper extremity. *Hand Clin*. 2010;26:447-53.
- Starosolski ZA, Kan JH, Rosenfeld SD, Krishnamurthy R, Annapragada A. Application of 3-D printing (rapid prototyping) for creating physical models of pediatric orthopedic disorders. *Pediatr Radiol*. 2014;44:216-21.
- Chen H, Guo K, Yang H, Wu D, Yuan F. Thoracic pedicle screw placement guide plate produced by three-dimensional (3-D) laser printing. *Med Sci Monit*. 2016;22:1682-6.
- Jastifer JR, Gustafson PA. Three-dimensional printing and surgical simulation for preoperative planning of deformity correction in foot and ankle surgery. *J Foot Ankle Surg*. 2016.
- Helguero CG, Kao I, Komatsu DE, Shaikh S, Hansen D, Franco J, et al. Improving the accuracy of wide resection of bone tumors and enhancing implant fit: A cadaveric study. *J Orthop*. 2015;12 Suppl 2:188-94.
- Matthews F, Messmer P, Raikov V, Wanner GA, Jacob AL, Regazzoni P, et al. Patient-specific three-dimensional composite bone models for teaching and operation planning. *J Digit Imaging*. 2009;22:473-82.
- Rankin TM, Giovinco NA, Cucher DJ, Watts G, Hurwitz B, Armstrong DG. Three-dimensional printing surgical instruments: Are we there yet? *J Surg Res*. 2014;189:193-7.
- Kong X, Nie L, Zhang H, Wang Z, Ye Q, Tang L, et al. Do 3D printing models improve anatomical teaching about hepatic segments to medical students? A randomized controlled study. *World J Surg*. 2016.
- Shaunak S, Dhinsa BS, Khan WS. The role of 3D modelling and printing in orthopaedic tissue engineering: A review of the current literature. *Curr Stem Cell Res Ther*. 2016.
- Pérez-Mañanes R, Burró JA, Manaute JR, Rodríguez FC, Vaquero Martín J. Printing cutting guides for open-wedge high tibial osteotomy: Do it yourself. *J Knee Surg*. 2016.
- Wu XB, Wang JQ, Zhao CP, Sun X, Shi Y, Zhang ZA, et al. Printed three-dimensional anatomic templates for virtual preoperative planning before reconstruction of old pelvic injuries: Initial results. *Chin Med J (Engl)*. 2015;128:477-82.
- Chung KJ, Huang B, Choi CH, Park YW, Kim HN. Utility of 3D printing for complex distal tibial fractures and maleolar avulsion fractures: Technical tip. *Foot Ankle Int*. 2015;36:1504-10.
- Bizzotto N, Sandri A, Regis D, Romani D, Tami I, Magnan B. Three-dimensional printing of bone fractures: A new tangible realistic way for preoperative planning and education. *Surg Innov*. 2015;22:548-51.
- Wu AM, Shao ZX, Wang JS, Yang XD, Weng WQ, Wang XY, et al. The accuracy of a method for printing three-dimensional spinal models. *PLoS One*. 2015.
- Wang YT, Yang XJ, Yan B, Zeng TH, Qiu YY, Chen SJ. Clinical application of three-dimensional printing in the personalized treatment of complex spinal disorders. *Chin J Traumatol*. 2016;19:31-4.
- Ma L, Zhou Y, Zhu Y, Lin Z, Wang Y, Zhang Y, et al. 3D-printed guiding templates for improved osteosarcoma resection. *Sci Rep*. 2016;6:233-5.
- Powers MK, Lee BR, Silberstein J. Three-dimensional printing of surgical anatomy. *Curr Opin Urol*. 2016;26:283-8.
- Malik HH, Darwood AR, Shaunak S, Kulatilake P, El-Hilly AA, Mulki O, et al. Three-dimensional printing in surgery: A review of current surgical applications. *J Surg Res*. 2015;199:512-22.
- Eltorai AE, Nguyen E, Daniels AH. Three-dimensional printing in orthopedic surgery. *Orthopedics*. 2015;38:684-7.