

Cirugía robótica pediátrica: primeras evaluaciones

Goedele van Haasteren, PhD, Susan Levine, DVM, PhD, y Winifred Hayes, PhD

OBJETIVOS: Este artículo revisa las pruebas de la factibilidad, la seguridad, los beneficios, las limitaciones y los costes de la cirugía con ayuda robótica en los niños, evalúa la comparación entre la tecnología y otras técnicas quirúrgicas pediátricas y ofrece previsiones sobre el futuro de la tecnología a corto y medio plazo.

MÉTODOS: Se revisó la bibliografía médica pediátrica con revisores externos en busca de estudios que ofrecieran pruebas de la factibilidad y la seguridad de la cirugía robótica en los niños y de estudios que comparasen la cirugía robótica pediátrica con la cirugía laparoscópica convencional o la cirugía a cielo abierto.

RESULTADOS: Ocho series de casos y 5 estudios comparativos entre la cirugía robótica y la realizada a cielo abierto o la cirugía laparoscópica convencional cumplieron los criterios de selección para la revisión. También se revisaron algunos estudios pequeños, centrados en raros procedimientos quirúrgicos complejos. Todos los estudios habían sido diseñados para evaluar la factibilidad y la seguridad de la cirugía robótica en los niños. Ninguno de los estudios fue aleatorizado, y algunos tenían un diseño retrospectivo. Estos estudios demostraron que una serie de procedimientos rutinarios laparoscópicos y torácicos, ayudados por robot, eran factibles y seguros en manos de cirujanos expertos en la técnica, aunque la cirugía robótica no consiguió unos resultados superiores a los de la cirugía tradicional laparoscópica y a cielo abierto. Las ventajas del sistema robótico fueron más evidentes en los procedimientos complejos que afectaron a áreas de difícil acceso y en procedimientos en los que fue necesaria la disección de estructuras anatómicas delicadas.

CONCLUSIONES: La cirugía robótica es factible y segura en una serie de procedimientos quirúrgicos pediátricos, aunque no hay pruebas de que ofrezca mejores resultados clínicos que las técnicas convencionales, laparoscópicas o a cielo abierto.

El empleo de la cirugía endoscópica en los niños se remonta a 1971, cuando Gans y Berci¹ investigaron e informaron de este abordaje mínimamente traumático en los lactantes y los niños. Desde entonces ha aumentado el tipo y el número de procedimientos endoscópicos a medida que los cirujanos se formaban en este abordaje, avanzaba la tecnología y los medios de comunicación conocieron las ventajas de la cirugía endoscópica en algunos procedimientos. Numerosos estudios han demostrado que, en comparación con la cirugía a cielo abierto, la de acceso mínimo provoca menos traumatismo operatorio, dolor postoperatorio, complicaciones y duración de la estancia hospitalaria, así como mejores resultados cosméticos. Sin embargo, la cirugía de mínimo acceso tiene una serie de limitaciones reconocidas, como la imagen bidimensional del campo quirúrgico, la falta de percepción de la profundidad, la menor información táctil, la restricción a los movimientos de los instrumentos, la poco intuitiva coordinación entre la vista y la mano y las posturas ergonómicamente fatigantes del cirujano y sus ayudantes. La cirugía endoscópica necesita del adecuado entrenamiento, y la escarpada curva de aprendizaje disuade a algunos cirujanos pediátricos del empleo de las técnicas endoscópicas²⁻⁷.

La cirugía robótica se ha desarrollado para ampliar las capacidades de los cirujanos y para abordar las dificultades y la morbilidad asociadas con la cirugía endoscópica. La interfase robótica podría mejorar las habilidades quirúrgicas reconstructivas laparoscópicas mediante el refinado movimiento fino del robot, la mejora de la visión (tridimensional), la percepción de la profundidad y el filtrado del temblor (tabla 1). Meiningger et al⁸ publicaron el primer caso robótico pediátrico en 2001, seguido rápidamente de otras publicaciones⁹⁻¹². En la actualidad, los robots se utilizan para realizar la mayoría de los procedimientos que pueden realizarse por vía laparoscópica y toracoscópica en los niños¹³⁻¹⁶.

TECNOLOGÍA

Sistemas robóticos

La Food and Drug Administration ha aprobado 2 sistemas robóticos, el Intuitive Surgical da Vinci Surgical System (Intuitive Surgical, Sunnyvale, CA) y el Zeus MicroWrist Surgical System (antes fabricado por Computer Motion, Santa Bárbara, CA), como ayuda para la realización de tareas y procedimientos laparoscópicos específicos en los adultos y los niños^{17,18}. Intuitive Surgical compró Computer Motion en 2003, y en la actuali-

Hayes Inc, Independent Health Technology Assessment Company, Lansdale, Pensilvania, Estados Unidos.

Correspondencia: Goedele van Haasteren, PhD, Hayes, 157 S. Broad St, Lansdale, PA 19446, Estados Unidos.

Correo electrónico: gvhaasteren@hayesinc.com

TABLA 1. Beneficios y limitaciones de la cirugía con ayuda robótica frente a la laparoscópica convencional

Beneficios	Limitaciones
Visión tridimensional de gran resolución	Tamaño del robot
Movimiento intuitivo	Limitada selección del instrumental
Control del temblor	Tiempo de colocación y retirada del robot
7 grados de libertad	Limitada gama de movimientos de los instrumentos de 5 mm
Escala de movimientos	Gran capital y costes de mantenimiento
Mejores aspectos ergonómicos	Elevado coste de los desechables
Curva de aprendizaje más breve para el cirujano novel	

dad sólo se comercializa para su empleo clínico el da Vinci Surgical System¹⁹. Consta de tres subsistemas, el de control del instrumento endoscópico, el sistema de visión InSite y los instrumentos EndoWrist.

Consideraciones especiales para los procedimientos pediátricos

El abordaje de la cirugía pediátrica con ayuda robótica es similar al de su homóloga en el adulto, aunque tiene algunos matices singulares. Como el espacio de trabajo es limitado en los niños y la pared abdominal suele ser más delgada, es muy importante la correcta ubicación de los puertos. El principio general de la cirugía robótica del adulto de mantener una distancia de 8 a 10 cm entre los puertos no es aplicable a los niños por el tamaño de su organismo. Los puertos se colocan para crear una distribución simétrica alrededor del puerto de la cámara, que se enfoca en el punto de interés. El pequeño espacio de trabajo plantea un mayor riesgo de lesión visceral inadvertida durante la introducción de los puertos y la manipulación de los instrumentos. Por ello, todas las manipulaciones deben realizarse bajo visión directa, especialmente para verificar la trayectoria pretendida de cada puerto o instrumento²⁰.

Se han desarrollado instrumentos de menor tamaño para los procedimientos pediátricos, que tienen 5 mm de diámetro en vez de la norma de 8 mm de los instrumentos utilizados en la cirugía del adulto. Los instrumentos EndoWrist de 5 mm consisten en portaagujas, tijeras, pinzas, instrumentos de moncauterio, instrumentos de energía ultrasónica y varios accesorios desechables y reutilizables. El mecanismo de un instrumento de 5 mm difiere al de su homónimo de 8 mm en que necesita una mayor distancia lineal para facilitar el acodamiento completo. Esto significa que un instrumento de 5 mm protruye más a través de la cánula robótica, lo que se debe tener en cuenta especialmente para trabajar en un espacio cerrado²¹. También se han desarrollado endoscopios bi y tridimensionales²².

REVISIÓN DE LAS PRUEBAS

Fuentes y selección de los datos

Las pruebas evaluadas en esta revisión se obtuvieron en la bibliografía médica pediátrica con revisión externa

y publicada entre 1966 y abril de 2009. Las búsquedas se limitaron a personas y a artículos en inglés, utilizando las expresiones “robotic surgery”, “robot-assisted surgery”, “robotic”, “robot”, “da Vinci Surgical System”, “intuitive system”, “remote-controlled”, “remote surgery”, “telecontrol”, “telesurgery”, “Zeus”, combinadas con “pediatric surgery”, “pediatrics”, “children” y “child”. Las búsquedas se centraron en los estudios que aportaron pruebas de la factibilidad y la seguridad de la tecnología y en los estudios que compararon la cirugía con ayuda robótica con la cirugía laparoscópica convencional o la cirugía a cielo abierto. También se seleccionaron y revisaron algunas pequeñas series de casos que describieron procedimientos quirúrgicos muy complejos, con ayuda robótica en pacientes muy jóvenes^{14,15,23-27} (“Procedimientos complejos”).

Resultados

Ocho series de casos y 5 estudios que compararon la cirugía robótica con la cirugía a cielo abierto o la cirugía laparoscópica convencional cumplieron los criterios de selección para una revisión detallada^{7,20,28-38}. Todos los estudios fueron diseñados para evaluar la factibilidad y la seguridad de la cirugía robótica en los niños. Tres de los estudios compararon los resultados de la cirugía robótica con los de la cirugía laparoscópica y 2 utilizaron como referencia la cirugía a cielo abierto. Ninguno de los estudios fue aleatorizado, y algunos tuvieron un diseño retrospectivo.

Las series de casos y los estudios comparativos detaillaron la realización de operaciones laparoscópicas, relativamente rutinarias, en niños en edad escolar; estos procedimientos implicaron los campos de la cirugía general, la urología y la cirugía cardiotorácica. La media del período de seguimiento en los grupos de cirugía con ayuda robótica fue de ~12 meses (límites: 1-20 meses). Los resultados operatorios principales notificados en los estudios fueron el tiempo operatorio, los fallos técnicos o las tasas de complicaciones intraoperatorias. Otros resultados operatorios fueron el tiempo del procedimiento quirúrgico, el tiempo de puesta en marcha del robot y el del establecimiento de los puertos, las tasas de conversión a cirugía a cielo abierto y la pérdida de sangre. Los resultados postoperatorios fueron la duración de la estancia hospitalaria, las complicaciones postoperatorias, el empleo de medicamentos analgésicos, los índices del dolor y los resultados del estudio funcional postoperatorio. Algunos informes presentaron información sobre las curvas de aprendizaje, y otros describieron las experiencias subjetivas de los cirujanos y sus opiniones respecto a la cirugía robótica pediátrica.

El tamaño de la muestra de estos estudios fue pequeño, entre 15 y 100 pacientes. La edad media de los pacientes fue de 7,8 años (límites: 1 día a 23 años), y el peso medio de 24,2 kg (límites: 2,2-103 kg). Dos estudios excluyeron a niños por su edad (< 2 o < 3 años) y otros dos excluyeron a niños con enfermedades o alteraciones coexistentes que pudieran interferir con la operación. En la mayoría de los estudios, los procedimientos fueron realizados por un equipo quirúrgico, compuesto por uno o dos cirujanos, un ayudante al lado del paciente y una enfermera quirúfanista (fig. 1). El grado de experiencia laparoscópica de los cirujanos varió significa-

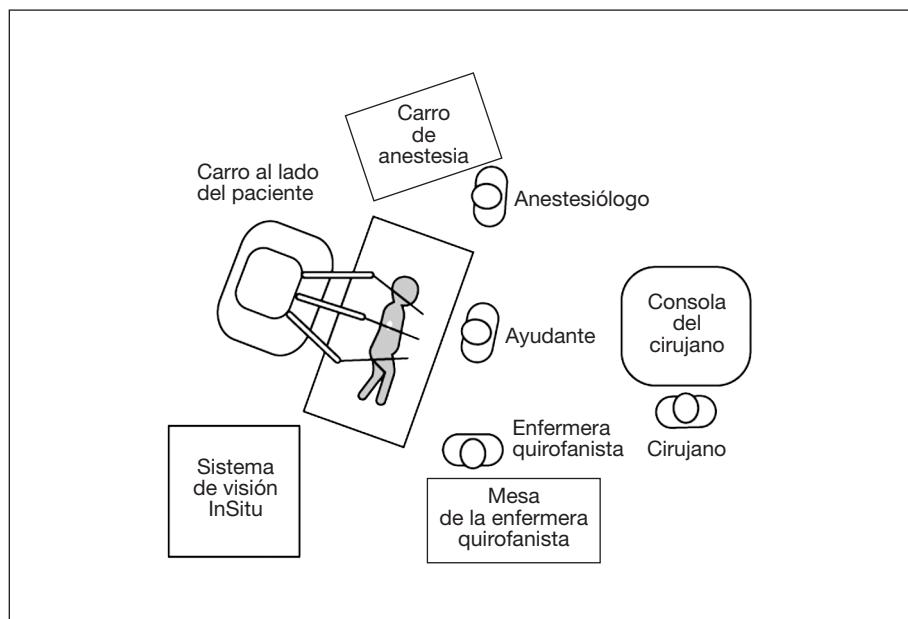


Fig. 1. Configuración del quirófano para la cirugía robótica.

tivamente. Un estudio autorizó a los residentes de cirugía de 4.º año con experiencia básica en cirugía mínimamente traumática a realizar el procedimiento³⁵. Se utilizaron dos sistemas quirúrgicos robóticos: el da Vinci Surgical System en 10 informes y el Zeus Surgical System en 3 informes. En la actualidad, la mayoría de los centros utiliza un sistema quirúrgico de 3 brazos, 2 instrumentales y uno para la cámara, creando un puerto para cada brazo. A menudo se coloca un puerto accesorio adicional para la retracción, la aspiración y la inserción y el corte de las suturas. Tras la presentación de los instrumentos pediátricos de 5 mm en 2004, algunos centros cambiaron los instrumentos de 8 mm por estos más pequeños, según el tamaño del paciente. De forma similar, algunos cirujanos cambiaron la cámara tridimensional inicial, de 12 mm, por la nueva cámara bidimensional de 5 mm cuando el tamaño de la cámara resultaba más importante para el éxito del procedimiento que la pérdida de la tercera dimensión visual^{22,39}.

Datos quirúrgicos

Tiempo operatorio y curva de aprendizaje

La variación del tiempo operatorio entre los cirujanos dependió de la experiencia previa con los procedimientos laparoscópicos estándar; por lo general, el tiempo disminuyó al aumentar la experiencia con el sistema robótico. La sustancial variación del tiempo operatorio entre los centros resultó de la falta de protocolos de procedimiento normalizado y de variaciones en las definiciones del tiempo de preparación, de operación y de estancia total en el quirófano. Dos centros médicos informaron del aumento del tiempo operatorio total en la pieloplastia con ayuda robótica en los niños, comparado con la cirugía a cielo abierto^{7,38}. No hubo diferencias de tiempo operatorio entre la pieloplastia con ayuda robótica y la pieloplastia laparoscópica convencional²⁹.

Sin embargo, el cierre del ductus arterial persistente (PDA) con ayuda robótica necesitó de un tiempo operatorio significativamente mayor que el de la cirugía videotoracoscópica tradicional a causa de la complejidad técnica de la colocación del robot³². En un pequeño estudio con datos de control histórico, la fundoplicatura con ayuda robótica necesitó de más tiempo que el abordaje laparoscópico o a cielo abierto²⁸. Por el contrario, Lehner et al³³ informaron de un tiempo operatorio total similar para la semifundoplicatura de Thal laparoscópica estándar y la realizada con ayuda robótica. La media del tiempo de colocación y de retirada del robot osciló entre 7 y 11 min, y la colocación del puerto osciló entre 17 y 23 min con personal entrenado^{30,31,34,35,38}. No se estudió el posible impacto del sistema quirúrgico específico (Zeus o da Vinci) sobre el tiempo operatorio.

Los investigadores que describieron las experiencias iniciales con la cirugía robótica pediátrica a menudo informaron de mejorías del tiempo operatorio para los procedimientos quirúrgicos estándar y complejos a medida que aumentaba su experiencia^{7,20,35,38}. Sin embargo, los cirujanos laparoscópicos entrenados no siempre experimentan una curva de aprendizaje o informan de una mejoría en la transición de la cirugía laparoscópica y la realizada con ayuda robótica⁴⁰. Para los cirujanos acostumbrados a la sutura intracorpórea, la interfase robótica puede no aumentar la velocidad o la calidad de los procedimientos laparoscópicos convencionales. Es necesario contar con más datos de cirujanos laparoscópicos experimentados y de residentes de cirugía para evaluar las curvas de aprendizaje de procedimientos o tareas específicas y para estimar el volumen de casos necesario para mantener la pericia. Aunque se espera la mejora del tiempo operatorio a medida que los cirujanos consigan experiencia, es probable que el dilatado tiempo operatorio siga siendo una desventaja de la tecnología, comparado con la cirugía a cielo abierto. En este contexto, es importante determinar si el prolongado tiempo operato-

rio refleja el mayor tiempo de anestesia, que podría ejercer un impacto adverso sobre el paciente, o reflejar el tiempo de preparación y el de limpieza, lo que podría tener consecuencias económicas, más que clínicas.

Complicaciones

Las tasas globales notificadas de complicaciones intra y postoperatorias asociadas con los procedimientos con ayuda robótica son bajas. En la bibliografía actual, las tasas de conversión a cirugía a cielo abierto oscilaron entre el 0% y el 13%^{7,20,28-38}. Esta amplia gama refleja los distintos grados de habilidad quirúrgica y la complejidad de los procedimientos realizados. La gran tasa de conversión, 13%, se informó en una serie de procedimientos técnicamente complejos, algunos de ellos realizados por residentes de cirugía sin una amplia experiencia robótica³⁵. La cirugía robótica también implica cierto grado de pérdida de sangre intraoperatoria. Hubo una tendencia a mayor pérdida de sangre tras la cirugía a cielo abierto que tras la realizada con ayuda robótica, pero ninguno de los estudios demostró una diferencia significativa^{7,37,38}.

Las complicaciones postoperatorias entre los pacientes tratados quirúrgicamente con éxito ocurrieron entre el 0% y el 14% de los casos. Estas complicaciones fueron neumotórax, persistencia de la derivación y necesidad de reintervención tras el cierre del PDA; ileo, regreso tardío de la motilidad intestinal y evisceración del epíplón a través del lugar de drenaje tras la pieloplastia, e ileo, disfagia, infección de la inserción del tubo de gastrostomía, síndrome del globo hinchado y degradación de la envoltura tras la fundoplicatura^{7,20,28-38}. Ninguna de estas complicaciones estuvo relacionada con el robot, y las tasas y los tipos de complicaciones correspondieron a las asociadas con los métodos laparoscópicos convencionales^{7,29,32,33,38,40-42}.

Datos postoperatorios

Duración de la estancia hospitalaria

Una ventaja de la cirugía ayudada por robot es su capacidad de disminuir la duración de la estancia hospitalaria, comparada con la cirugía a cielo abierto, y una serie de informes publicados ofrece pruebas de este beneficio. La estancia hospitalaria de la pieloplastia ayudada por robot disminuyó en ~1 día, comparado con la cirugía a cielo abierto^{7,38}. Anderberg et al⁴³ observaron una disminución de 2 días de la estancia hospitalaria postoperatoria al comparar la fundoplicatura con ayuda de robot con el abordaje quirúrgico a cielo abierto. No hubo diferencias en la estancia hospitalaria tras el cierre del PDA o la pieloplastia con ayuda de robot, comparado con los correspondientes abordajes laparoscópicos^{29,32}. La media de la estancia hospitalaria fue de 2,3 días (límites: 0,5-6 días) para la pieloplastia, 2,6 días (límite: 0-10 días) para la fundoplicatura y 2 días (límite: 0-4 días) para el cierre del PDA^{7,20,28-38}. A medida que los centros médicos han conseguido mayor experiencia con la cirugía robótica han aparecido nuevos patrones de la práctica. Por ejemplo, en el caso de la pieloplastia en los niños, la estancia postoperatoria en un hospital estadounidense disminuyó de 2 a 3 días a un día tras dar de alta a los pa-

cientes con una sonda Foley permanente²⁰. En los próximos años es probable que las políticas de alta hospitalaria sigan evolucionando según la tecnología.

Dolor

Los índices del dolor postoperatorio evaluados tras la pieloplastia a cielo abierto y con ayuda de robot no demostraron dolor en ninguno de los niños sometidos a una pieloplastia con ayuda de robot^{7,29,38}. El empleo de analgésicos, postoperatorio y durante toda la estancia hospitalaria, fue significativamente menor tras la pieloplastia y la fundoplicatura con ayuda robótica respecto a tras la cirugía a cielo abierto. Otro estudio comparativo sobre la pieloplastia mostró una tendencia similar en el consumo de morfina, aunque la diferencia no fue significativa³⁸. Los estudios que comparan la cirugía robótica con la cirugía laparoscópica convencional raras veces informaron de dolor y de consumo de analgésicos, probablemente porque no se esperaba el cambio de estos resultados con la presentación de la interfase robótica. Las pruebas de las poblaciones pediátricas y adultas acerca de los resultados postoperatorios a largo plazo se basan principalmente en observaciones informales y sugieren que no hay diferencias entre la cirugía a cielo abierto, la laparoscópica y la robótica^{7,29,38,43-47}. El dolor, la recuperación a corto y a largo plazo y las evaluaciones de la calidad de vida son esenciales como resultados directos del paciente en los futuros estudios sobre la cirugía robótica.

Resultados funcionales

La mejoría de los resultados funcionales tras la cirugía, observada en algunos estudios, demostró el éxito a corto plazo de los procedimientos quirúrgicos con ayuda de robot. Se utilizó la medición del pH durante 24 h para evaluar la eficacia quirúrgica de la fundoplicatura, y las exploraciones ecográficas o las pruebas de aclaramiento renal para demostrar el éxito quirúrgico de la pieloplastia. Los estudios demostraron unos resultados funcionales favorables tras la intervención quirúrgica en todos los grupos de tratamiento, sin diferencias entre la cirugía con ayuda robótica, la laparoscópica y la realizada a cielo abierto^{7,28,29,33,34}. En general, los períodos de seguimiento del estudio fueron demasiado cortos para evaluar el impacto de la cirugía ayudada con robot sobre el control a largo plazo de la enfermedad, comparado con otras técnicas quirúrgicas.

Experiencias y opiniones de los cirujanos

Los cirujanos sin experiencia en el campo de la cirugía robótica pueden beneficiarse de las experiencias de los cirujanos especialistas. Muchos de los informes de la cirugía con ayuda robótica presentaron las observaciones iniciales de los cirujanos. Aunque los resultados no fueron cuantificables, las observaciones mostraban un gran consenso. Las imágenes tridimensionales, panorámicas, de gran resolución con percepción de profundidad, la instrumentación articulada, el movimiento intuitivo y la disminución del temblor fueron calificadas como ventajas de la cirugía robótica, comparada con la laparoscopia convencional. Los instrumentos robóticos

articulados ofrecieron mayor libertad de movimientos, y el ajuste del movimiento aumentó la destreza y la precisión del cirujano durante la manipulación y la sutura. Otras ventajas advertidas fueron la restauración de una coordinación entre la vista y la mano casi normal, mejores aspectos ergonómicos y una cómoda postura en sentido, que son especialmente importantes en los procedimientos quirúrgicos prolongados. Además, la cirugía robótica permitió a los cirujanos con escasa experiencia laparoscópica realizar tareas técnicamente difíciles²⁹ (como la sutura intracorpórea). En conjunto, los cirujanos coinciden en que la cirugía robótica era más rápida y más fácil de aprender que su equivalente laparoscópico^{35,36,48}.

La complejidad técnica de la colocación del robot fue descrita como una desventaja en los procedimientos con ayuda robótica para el PDA³². Las limitaciones generales consistieron en la relativamente limitada selección de instrumentos, el tamaño del robot, la necesidad de formación específica, los prolongados tiempos de colocación y de retirada y la falta de sensación táctil. El gran tamaño del sistema y las dimensiones del instrumento fueron considerados como las principales barreras al empleo de la tecnología en la población pediátrica en estudio^{27,35}. Como en la cirugía laparoscópica, la falta de sensación táctil fue una limitación esperada de la tecnología. No obstante, varios cirujanos expresaron su sorpresa acerca del escaso impacto de la falta de sensación táctil sobre su capacidad de realizar los procedimientos. Según estos cirujanos, la introducción de una cámara tridimensional compensó la falta de sensación táctil^{27,35,49}.

Riesgos

Los sistemas quirúrgicos con ayuda robótica se asocian con riesgos y preocupaciones específicas que van más allá del quirófano. Los riesgos relevantes son el fallo del sistema informático, la pérdida de comunicación entre el cirujano y el quirófano, las complicaciones intraoperatorias que obligan a una atención inmediata y el posible retraso o pérdida de datos durante la transmisión, especialmente si intervienen distancias importantes o numerosas redes^{50,51} (es decir, redes de servicios digitales integrados o redes de transferencia asincrónica). Otras preocupaciones asociadas con la cirugía robótica remota son los problemas éticos y legales, como los conflictos relativos a la jurisdicción cuando interviene > 1 hospital o estado, los problemas de responsabilidad por malpraxis y el riesgo de invasión de la privacidad cuando un gran volumen de información sensible se difunde por líneas de telecomunicación⁵⁰⁻⁵². Para conseguir una mayor aceptación de la tecnología en general será necesario que todas las partes implicadas aborden estos riesgos y problemas relacionados con el robot.

Costes

Una importante desventaja de la cirugía robótica avanzada en los centros pediátricos es su elevado coste. En Estados Unidos, el coste institucional del da Vinci Surgical System es cercano a 1.000.000 de dólares, con una tarifa anual de mantenimiento de 100.000 dólares a partir del segundo año. Suponiendo una vida útil de 5 años del sistema robótico y la realización de 100 casos

robóticos al año, se puede añadir 2.800 dólares al coste operatorio de cada caso robótico. El coste de cada instrumento endoscópico es de unos 2.000 dólares, y cada instrumento se utiliza ~10 veces. Por lo tanto, al coste total se puede añadir 200 dólares por instrumento y 800 dólares por caso⁵³.

Tres análisis del coste de la colecistectomía, la pieloplastia y la reparación de la válvula mitral ayudadas por robot en los adultos demostraron unos mayores costes hospitalarios globales que los métodos quirúrgicos laparoscópicos convencionales. El aumento de coste provino de la amortización, los costes de mantenimiento, el coste de los consumibles y el mayor tiempo operatorio^{40,53,54}. Los procedimientos robóticos sólo fueron considerados rentables en un marco de gran volumen con tiempos operatorios más breves.

Procedimientos complejos

Varios procedimientos quirúrgicos técnicamente complejos se pueden realizar utilizando el instrumental laparoscópico existente. No obstante, el dominio de estos procedimientos complejos en un ambiente quirúrgico de acceso mínimo es difícil, y los sistemas quirúrgicos robóticos pueden facilitar estas operaciones técnicamente difíciles. En la bibliografía actual, muchos estudios pequeños describen los procedimientos quirúrgicos complejos con ayuda robótica como alternativa a los procedimientos a cielo abierto o a los laparoscópicos convencionales. Los procedimientos técnicamente complejos con ayuda robótica notificados en los niños son la reintervención de pieloplastia, la exérésis de los residuos de los conductos de Müller y Wolff y de los quistes de la vesícula seminal, la reparación de la hernia diafragmática congénita de Bochdalek, la portoenterostomía de Kasai, la extirpación del quiste de colédoco, la litotomía y el cierre de un defecto septal auricular^{14-16,27,40-42,44,55-57} (tabla 2). Todos los procedimientos fueron técnicamente factibles. Los beneficios generales del abordaje robótico fueron la facilitación de la disección y la sutura intracorpórea y el aumento de las estructuras quirúrgicamente cesibles. Las limitaciones del abordaje robótico fueron el pequeño tamaño del territorio abdominal y la limitada gama de movimientos del robot da Vinci estándar, lo que prolongó el tiempo de sutura^{24,27,40,56}. Para evitar conflic-

TABLA 2. Procedimientos con ayuda robótica en los niños

Procedimientos rutinarios	Procedimientos complejos
Fundoplicatura de Nissen Pieloplastia desmembrada (Andreson y Hynes) Cierre del PDA	Reintervención de pieloplastia Exérésis de residuos de los conductos de Müller y de Wolff Extirpación de un quiste de la vesícula seminal
Nefrectomía	Reparación de la hernia diafragmática congénita de Bochdalek Portoenterostomía de Kasai
Diverticulectomía calicial Cirugía antirreflujo	Exérésis de un quiste de colédoco Litotomía Cierre de un defecto septal auricular Reimplantación ureteral Nefrectomía parcial Aumento vesical Procedimiento de Mitrofanoff

PDA: ductus arterial persistente.

tos en el instrumento, los puertos deben estar separados en al menos 4 a 6 cm, lo que excluye a los niños muy pequeños y a los lactantes⁴³. En la cirugía cardíaca, algunos cirujanos imponen criterios de peso/edad mínima a los pacientes para evitar colisiones de los brazos y una visión restringida^{28,37}. El prolongado tiempo de sutura puede aminorarse con el empleo del da Vinci S Surgical System de última generación, que tiene un mayor grado de movimiento^{46,58}. Sin embargo, es necesario realizar nuevos estudios para establecer el papel de la cirugía robótica en estos casos quirúrgicos complejos.

FUTURO DE LA TECNOLOGÍA

La cirugía robótica pediátrica todavía está en sus fases iniciales de desarrollo, como demuestra la naturaleza exploradora de la mayoría de los estudios publicados. Como en la evolución de la laparoscopia tradicional, es probable que los aspectos técnicos y periféricos de la tecnología sigan mejorando. Las áreas adicionales de mejoría pueden centrarse en la miniaturización de los instrumentos y del aparato robótico, el aumento de la sensación táctil, la creación de instrumentos con múltiples funciones, la mejora de los aspectos de seguridad para prevenir las lesiones inadvertidas lejanas al campo operatorio y la creación de sistemas que superen el sistema laparoscópico tradicional de puertos para cada brazo robótico. Un ejemplo de este último aspecto es un robot miniaturizado inalámbrico que se inserta por vía intraabdominal y no necesita una conexión rígida extracorpórea³⁰. Con el desarrollo de instrumentos robóticos sofisticados, que permiten una mayor sensación de tacto, incluyendo una pinza endoscópica informatizada, se ha progresado en la dirección de aumentar la sensación táctil. Kitagawa et al⁵⁹ han intentado sustituir la sensación táctil directa por claves visuales y auditivas que alerten al cirujano durante la colocación de nudos. En un futuro más lejano, cuando se estudien y conserven en sistemas informáticos especiales las técnicas de los cirujanos expertos, los robots podrán realizar procedimientos quirúrgicos con poca o ninguna intervención humana. Pappone et al han desarrollado un programa informático que utiliza datos tomados de varios cirujanos y de miles de operaciones para realizar una operación quirúrgica sin intervención humana⁶⁰. Esto podría ampliar la disponibilidad de procedimientos quirúrgicos complicados, llegando incluso a pacientes de regiones que carecen de las adecuadas instalaciones médicas.

En la cirugía cardíaca, la manipulación de la interfase digital/visual puede posibilitar el trabajo en el corazón que late en una "quietud virtual". Suematsu y Del Nido⁶¹ mencionaron el desarrollo de un sistema integrado de eliminación del movimiento, que consta de sistemas de estabilización visual y de estabilización del movimiento. El movimiento de los instrumentos robóticos y de la cámara puede sincronizarse con cada latido, lo que consigue cancelar el movimiento cardíaco y aumentar la precisión quirúrgica. La combinación de la tecnología de la imagen intracardíaca y los sistemas de ayuda al rastreo con la destreza y la estabilidad de los instrumentos robóticos puede facilitar la realización segura y fiable de procedimientos intracardíacos, sin bomba, como el cierre de la comunicación interauricular y la reparación de la insuficiencia de la válvula mitral⁶¹.

Un programa informático de realidad virtual para la simulación preoperatoria del procedimiento, la definición de la óptima colocación del puerto y la "realidad aumentada" mediante la superposición intraoperatoria de la información radiológica (tomografía computadorizada, RM o tomografía por emisión de positrones), digital y anatómica en el monitor podrían formar parte de un futuro sistema que ofrece ventajas técnicas, además de su empleo como herramienta de entrenamiento del cirujano⁶². La realización de la telemonitorización es otro aspecto de la cirugía robótica que puede evolucionar rápidamente; acoplando 2 consolas, un instructor experto puede supervisar a un cirujano en formación. Tanto el instructor como el formador tendrían imágenes detalladas del campo operatorio, y el instructor podría enseñar o corregir una manipulación quirúrgica desde una consola. Este concepto de aprendizaje podría llegar a sustituir el aprendizaje individual de la formación que ha dominado la cirugía en los últimos siglos⁶³.

CONCLUSIONES

La cantidad de evidencia que evalúa la cirugía robótica pediátrica todavía es pequeña. Los estudios disponibles demuestran que una serie de procedimientos rutinarios, laparoscópicos y toracoscópicos, con ayuda robótica son factibles y seguros cuando los realizan cirujanos expertos en estas técnicas, aunque es prematuro concluir que la cirugía robótica ofrece resultados clínicos superiores a los de la cirugía laparoscópica tradicional y a la realizada a cielo abierto. Hasta ahora, las ventajas de los sistemas robóticos se han demostrado principalmente en procedimientos complejos que implican áreas de difícil acceso y en procedimientos en los que es necesaria la disección de estructuras anatómicas delicadas y vulnerables. Sin embargo, por el mayor tiempo operatorio, el mayor coste y la falta de ventaja clínica, la cirugía robótica no constituye en la actualidad una alternativa general a la cirugía convencional mínimamente traumática.

Son necesarios protocolos clínicos estándar, programas de formación establecidos, criterios definidos de selección del paciente y análisis de coste favorables para demostrar el valor de la tecnología a una escala más amplia. Respecto a los pacientes pediátricos, el desarrollo de sistemas robóticos de menor tamaño y la expansión de la selección de instrumentos de 5 mm pueden mejorar la utilidad de la tecnología. Finalmente, antes de que la cirugía robótica remota aumente su predominio en el futuro, quedan por resolver una serie de problemas de seguridad, legales y éticos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Gans SL, Berci G. Advances in endoscopy of infants and children. *J Pediatr Surg*. 1971; 6(2):199-233.
2. Najmaldin A, Guillou PA. A guide to laparoscopic surgery. Oxford, Inglaterra: Blackwell Sciences; 1998.
3. Baker LA, Docimo SG, Surer I, et al. A multiinstitutional analysis of laparoscopic orchidopexy. *BJU Int*. 2001;87(6):484-9.
4. Horowitz M, Shah SM, Ferzli G, et al. Laparoscopic partial upper pole nephrectomy in infants and children. *BJU Int*. 2001;87(6):514-6.
5. Yeung CK, Tam YH, Sihoe JD, et al. Retroperitoneoscopic dismembered pyeloplasty for pelviureteric junction ob-

- truction in infants and children. *BJU Int.* 2001;87(6): 509-13.
6. Jarrett TW, Chan DY, Charambura TC, et al. Laparoscopic pyeloplasty: the first 100 cases. *J Urol.* 2002;167(3): 1253-6.
 7. Lee RS, Retik AB, Borer JG, Peters CA. Pediatric robot assisted laparoscopic dismembered pyeloplasty: comparison with a cohort of open surgery. *J Urol.* 2006;175(2):683-7.
 8. Meininger DD, Byhahn C, Heller K, et al. Totally endoscopic Nissen fundoplication with a robotic system in a child. *Surg Endosc.* 2001;15(11):1360.
 9. Heller K, Gutt C, Schaeff B, Beyer PA, Markus B. Use of the robot system Da Vinci for laparoscopic repair of gastroesophageal reflux in children. *Eur J Pediatr Surg.* 2002;12(4):239-42.
 10. Morgan JA, Ginsburg ME, Sonett JR, et al. Advanced thoracoscopic procedures are facilitated by computer-aided robotic technology. *Eur J Cardiothorac Surg.* 2003;23(6):883-7.
 11. Olsen LH, Deding D, Yeung CK, Jørgensen TM. Computer assisted laparoscopic pneumovesical ureter reimplantation a.m. Cohen: initial experience in a pig model. *APMIS Suppl.* 2003;(109):23-5.
 12. Tewari A, Srivastava A, Menon M; Members of the VIP Team. A prospective comparison of radical retropubic and robot-assisted prostatectomy: experience in one institution. *BJU Int.* 2003;92(3):205-10.
 13. Najmaldin A. Paediatric telerobotic surgery: where do we stand. *Int J Med Robot.* 2007; 3(3):183-6.
 14. Passerotti C, Cendron M, Gargollo P, et al. Minimally invasive surgical approaches to retrovesical structures. *Int J Med Robot.* 2007;3(4):307-11.
 15. Passerotti CC, Diamond DA, Borer JG, et al. Robot-assisted laparoscopic ureteroureterostomy: description of technique. *J Endourol.* 2008;22(4):581-5.
 16. Passerotti CC, Nguyen HT, Eisner BH, et al. Laparoscopic reoperative pediatric pyeloplasty with robotic assistance. *J Endourol.* 2007;21(10):1137-40.
 17. Food and Drug Administration. 510(k) Premarket Notification Database search for K965001 [consultado 20/5/2009]. Disponible en: www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfPMN/pmn.cfm?ID=112411
 18. Food and Drug Administration. 510(k) Premarket Notification Database search for K003431 [consultado 20/5/2009]. Disponible en: www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfPMN/pmn.cfm?ID=2785
 19. Intuitive Surgical. Da Vinci Surgical System: Frequently Asked Questions (FAQ). Disponible en: www.intuitivesurgical.com/corporate/newsroom/mediakit/da_Vinci_Surgical_System_FAQ.doc
 20. Volfsen IA, Munver R, Esposito M, et al. Robot-assisted urologic surgery: safety and feasibility in the pediatric population. *J Endourol.* 2007;21(11):1315-8.
 21. Peters CA. Robotically assisted surgery in pediatric urology. *Urol Clin North Am.* 2004; 31(4):743-52.
 22. Intuitive Surgical. The da Vinci Surgical System [consultado 20/5/2009]. Disponible en: www.intuitivesurgical.com/products/davinci_surgicalsystem/index.aspx
 23. Woo R, Le D, Albanese CT, Kim SS. Robotassisted laparoscopic resection of a type I choledochal cyst in a child. *J Laparoendosc Adv Surg Tech A.* 2006;16(2):179-83.
 24. Baird CW, Stamou SC, Skipper E, Watts L. Total endoscopic repair of a pediatric atrial septal defect using the da Vinci robot and hypothermic fibrillation. *Interact Cardiovasc Thorac Surg.* 2007;6(6):828-9.
 25. Lee RS, Passerotti CC, Cendron M, et al. Early results of robot assisted laparoscopic lithotomy in adolescents. *J Urol.* 2007;177(6):2306-10.
 26. Meehan JJ, Elliott S, Sandler A. The robotic approach to complex hepatobiliary anomalies in children: preliminary report. *J Pediatr Surg.* 2007;42(12):2110-4.
 27. Meehan JJ, Sandler A. Robotic repair of a Bochdalek congenital diaphragmatic hernia in a small neonate: robotic advantages and limitations. *J Pediatr Surg.* 2007;42(10): 1757-60.
 28. Anderberg M, Kockum CC, Arnþjörnsson E. Robotic fundoplication in children. *Pediatr Surg Int.* 2007;23(2):123-7.
 29. Franco I, Dyer LL, Zelkovic P. Laparoscopic pyeloplasty in the pediatric patient: hand sewn anastomosis versus robotic assisted anastomosis: is there a difference? *J Urol.* 2007; 178(4):1483-6.
 30. Klein MD, Langenburg SE, Kabeer M, et al. Pediatric robotic surgery: lessons from a clinical experience. *J Laparoendosc Adv Surg Tech A.* 2007;17(2):265-71.
 31. Knight CG, Lorincz A, Gidell KM, et al. Computer-assisted robot-enhanced laparoscopic fundoplication in children. *J Pediatr Surg.* 2004;39(6):864-6.
 32. Le Bret E, Papadatos S, Folliguet T, et al. Interruption of patent ductus arteriosus in children: robotically assisted versus videothoracoscopic surgery. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2002;123(5):973-6.
 33. Lehnhert M, Richter B, Beyer PA, Heller K. A prospective study comparing operative time in conventional laparoscopic and robotically assisted Thal semifundoplication in children. *J Pediatr Surg.* 2006;41(8):1392-6.
 34. Meehan JJ, Meehan TD, Sandler A. Robotic fundoplication in children: resident teaching and a single institutional review of our first 50 patients. *J Pediatr Surg.* 2007;42(12): 2022-5.
 35. Meehan JJ, Sandler A. Pediatric robotic surgery: a single-institutional review of the first 100 consecutive cases. *Surg Endosc.* 2008;22(1):177-82.
 36. Najmaldin A, Antao B. Early experience of tele-robotic surgery in children. *Int J Med Robot.* 2007;3(3):199-202.
 37. Suematsu Y, Mora BN, Mihajevic T, del Nido PJ. Totally endoscopic robotic-assisted repair of patent ductus arteriosus and vascular ring in children. *Ann Thorac Surg.* 2005; 80(6):2309-13.
 38. Yee DS, Shanberg AM, Duel BP, et al. Initial comparison of robotic-assisted laparoscopic versus open pyeloplasty in children. *Urology.* 2006;67(3):599-602.
 39. Olympus Imaging America. Olympus develops unique 3D/2D imaging system for Intuitive Surgical's da Vinci® Surgical System, October 20, 2003 [consultado 20/5/2009]. Disponible en: www.olympusamerica.com/cpg_section/cpg_headlineDetails.asp?pressNo=275
 40. Link RE, Bhayani SB, Kavoussi LR. A prospective comparison of robotic and laparoscopic pyeloplasty. *Ann Surg.* 2006;243(4):486-91.
 41. McHoney M, Eaton S, Wade A, et al. Inflammatory response in children after laparoscopic vs open Nissen fundoplication: randomized controlled trial. *J Pediatr Surg.* 2005;40(6): 908-13.
 42. Ravish IR, Nerli RB, Reddy MN, Amarkhed SS. Laparoscopic pyeloplasty compared with open pyeloplasty in children. *J Endourol.* 2007;21(8):897-902.
 43. Anderberg M, Kockum CC, Arnþjörnsson E. Morgagni hernia repair in a small child using da Vinci robotic instruments: a case report. *Eur J Pediatr Surg.* 2009;19(2):110-2.
 44. Wu JC, Wu HS, Lin MS, et al. Comparison of robot-assisted laparoscopic adrenalectomy with traditional laparoscopic adrenalectomy: 1 year follow-up. *Surg Endosc.* 2008; 22(2):463-6.
 45. Bernie JE, Venkatesh R, Brown J, et al. Comparison of laparoscopic pyeloplasty with and without robotic assistance. *JSLS.* 2005;9(3):258-61.
 46. Casale P. Robotic pyeloplasty in the pediatric population. *Curr Opin Urol.* 2009;19(1):97-101.
 47. Hyams ES, Mufarrij PW, Stifelman MD. Robotic renal and upper tract reconstruction. *Curr Opin Urol.* 2008;18(6): 557-63.
 48. Peters C. Laparoscopy in paediatric urology: adoption of innovative technology. *BJU Int.* 2003;92(Suppl 1):52-7.
 49. Giulianotti PC, Coratti A, Angelini M, et al. Robotics in general surgery: personal experience in a large community hospital. *Arch Surg.* 2003;138(7):777-84.
 50. Eadie LH, Seifalian AM, Davidson BR. Telemedicine in surgery. *Br J Surg.* 2003;90(6): 647-58.
 51. Link RE, Schulam PG, Kavoussi LR. Telesurgery: remote monitoring and assistance during laparoscopy. *Urol Clin North Am.* 2001;28(1):177-88.
 52. Stanberry B. Telemedicine: barriers and opportunities in the 21st century. *J Intern Med.* 2000;247(6):615-28.

53. Morgan JA, Thornton BA, Peacock JC, et al. Does robotic technology make minimally invasive cardiac surgery too expensive? A hospital cost analysis of robotic and conventional techniques. *J Card Surg.* 2005;20(3):246-51.
54. Breitenstein S, Nocito A, Puhan M, et al. Robotic-assisted versus laparoscopic cholecystectomy: outcome and cost analyses of a case-matched control study. *Ann Surg.* 2008;247(6):987-93.
55. Desautel MG, Stock J, Hanna MK. Müllerian duct remnants: surgical management and fertility issues. *J Urol.* 1999;162(3):1008-13.
56. Ferguson JL, Beste TM, Nelson KH, Daucher JA. Making the transition from standard gynaecologic laparoscopy to robotic laparoscopy. *JSLS.* 2004;8(4):326-8.
57. Kornprat P, Werkgartner G, Cerwenka H, et al. Prospective study comparing standard and robotically assisted laparoscopic cholecystectomy. *Langenbecks Arch Surg.* 2006;391(3):216-21.
58. Intuitive Surgical. da Vinci S HD Surgical System [consultado 20/5/2009]. Disponible en: www.intuitivesurgical.com/products/davincisurgicalsystem/index.aspx
59. Kitagawa M, Dokko D, Okamura AM, Yuh DD. Effect of sensory substitution on suturemanipulation forces for robotic surgical systems. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2005;129(1):151-8.
60. United Press International. Robot carries out operation by itself, May 19, 2006 [consultado 20/5/2009]. Disponible en: www.physorg.com/news67222790.html
61. Suematsu Y, del Nido PJ. Robotic pediatric cardiac surgery: present and future perspectives. *Am J Surg.* 2004;188(4A Suppl):98S-103S.
62. Byrne JP, Mughal MM. Telementoring as an adjunct to training and competence-based assessment in laparoscopic cholecystectomy. *Surg Endosc.* 2000;14(12):1159-61.
63. Rassweiler J, Safi KC, Subotic S, et al. Robotics and telesurgery: an update on their position in laparoscopic radical prostatectomy. *Minim Invasive Ther Allied Technol.* 2005;14(2):109-22.