

# Experiencia inicial en la impresión 3D para el uso de barras de Nuss personalizadas en la cirugía del pectus excavatum

M. Gaspar Pérez<sup>1</sup>, B. Núñez García<sup>1</sup>, N. Álvarez García<sup>1</sup>, F. Fillat-Gomà<sup>2</sup>, S. Coderch-Navarro<sup>2</sup>, N. Monill-Raya<sup>2</sup>, C. Esteva Miró<sup>1</sup>, J.E. Betancourth Alvarenga<sup>1</sup>, J. Jiménez Gómez<sup>1</sup>, S. Santiago Martínez<sup>1</sup>, B. San Vicente Vela<sup>1</sup>, P. Jiménez-Arribas<sup>1</sup>, J.R. Güizzo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Cirugía Pediátrica. Hospital Universitari Parc Taulí. Sabadell (Barcelona). <sup>2</sup>3D Surgical Planning Lab. Parc Taulí Hospital Universitari. Institut d'Investigació i Innovació Parc Taulí (I3PT). Universitat Autònoma de Barcelona. Sabadell (Barcelona).

## RESUMEN

**Introducción.** La corrección quirúrgica del pectus excavatum (PE) con técnica de Nuss, se basa en la inserción intratorácica de una (o más) barras metálicas para la corrección del defecto anatómico. El número de barras, su longitud, forma y punto de inserción torácico, se deciden durante la cirugía, según la morfología del paciente, el TC y, fundamentalmente, la experiencia del cirujano.

**Objetivos.** Evaluar la utilidad del diseño, simulación e impresión 3D de barras de Nuss personalizadas para cada paciente.

**Material y métodos.** Estudio descriptivo prospectivo, incluyendo a todos los pacientes intervenidos de PE bajo impresión 3D entre junio-diciembre 2019. Se diseñó la curvatura, longitud de la barra y espacio intercostal óptimo, en base al TC diagnóstico, y se imprimió en 3D en tamaño real. El modelo resultante se reprodujo prequirúrgicamente sobre material protésico habitual, se esterilizó y se reservó hasta la cirugía.

**Resultados.** Se recogieron 6 pacientes, mediana de edad 15 años (rango intercuartil 14,25-15,25 años). Mediana del Índice de Haller 4,05 (rango intercuartil 3,5-4,49) e índice de corrección 36,98% (rango intercuartil 33,86-38,48%). Se introdujo una barra de Nuss en todos los casos, sin precisar retirada ni reinsertión. Mediana del tiempo quirúrgico 79,5 minutos (rango intercuartil 72,5-103 min). Ninguna complicación postquirúrgica durante el seguimiento (12 meses).

**Conclusiones.** El diseño prequirúrgico de la barra de Nuss, mediante forma y tamaño personalizados, facilita la planificación del procedimiento. A su vez, permite conseguir la corrección morfológica más óptima y precisa posible, según la anatomía del paciente, disminuyendo el riesgo de precisar retirada y/o reinsertión de la barra, y por ende de complicaciones quirúrgicas.

**PALABRAS CLAVE:** Pectus excavatum; Impresión 3D; Nuss.

## INITIAL EXPERIENCE WITH 3D PRINTING IN THE USE OF CUSTOMIZED NUSS BARS IN PECTUS EXCAVATUM SURGERY

### ABSTRACT

**Introduction.** Pectus excavatum (PE) surgical repair according to Nuss procedure is based on the intrathoracic insertion of one (or more) metallic bars for anatomical defect repair. Number of bars, bar length, bar shape, and thoracic insertion site are established during surgery, according to patient morphology, CT-scan, and especially the surgeon's experience.

**Objective.** To assess the usefulness of the design, simulation, and 3D printing of customized Nuss bars for each patient.

**Materials and methods.** A prospective descriptive study of all patients undergoing PE surgery under 3D printing from June to December 2019 was carried out. Curvature, bar length, and optimal intercostal space were designed based on diagnostic CT-scan, and they were 3D printed full size. The resulting model was reproduced preoperatively on the usual prosthetic material, sterilized, and kept until surgery.

**Results.** The study cohort consisted of 6 patients. Median age was 15 years old (interquartile range: 14.25-15.25), median Haller index was 4.05 (interquartile range: 3.5-4.49), and repair index was 36.98% (interquartile range: 33.86-38.48%). A Nuss bar was introduced in all cases, without requiring removal or re-insertion. Median operating time was 79.5 minutes (interquartile range: 72.5-103). No postoperative complications were noted during follow-up (12 months).

**Conclusions.** The preoperative design of Nuss bars with customized shape and size facilitates surgical planning. It also allows for the most optimal and accurate morphological repair possible, according to patient anatomy, thus reducing the risk of requiring removal and/or re-insertion, and therefore, of surgical complications.

**KEY WORDS:** Pectus excavatum; 3D printing; Nuss.

## INTRODUCCIÓN

El pectus excavatum (PE) es la deformidad congénita torácica más frecuente<sup>(1,2)</sup>. Se define como la depresión de la pared torácica anterior, dando como resultado un "tórax en embudo" o *funnel chest*. Generalmente, afecta desde la tercera

**Correspondencia:** Dra. Mireia Gaspar Pérez.

E-mail: mperezg@tauli.cat

Recibido: Mayo 2020

Aceptado: Septiembre 2020

a la séptima costilla o cartílagos costales, siendo más severa la depresión del xifoides<sup>(3)</sup>.

El PE constituye el 90% de todas las deformidades de la pared torácica, con una prevalencia de 1/300 a 1/1.000 recién nacidos vivos, y una relación de 5:1 entre hombres y mujeres<sup>(3)</sup>.

La corrección quirúrgica del PE mediante técnica de Nuss, se basa en la inserción torácica de una barra metálica (barra de Nuss) para la corrección del defecto anatómico<sup>(4,5)</sup>. Se trata de un procedimiento quirúrgico mínimamente invasivo, guiado por toracoscopia, bien establecido y estandarizado. No obstante, en el procedimiento clásico, la longitud de la barra, la cantidad de barras necesarias, la forma que estas deben adquirir, y el punto de inserción intratorácico, se deciden durante el propio acto quirúrgico<sup>(4,5)</sup>.

Tradicionalmente, la longitud de la barra se determina colocando un *phantom* en forma de barra sobre el contorno externo del paciente, considerando que debe abarcar el espacio comprendido entre ambas líneas axilares medias<sup>(5)</sup>. La determinación de la forma de la barra se basa en la morfología externa del tórax del paciente junto al TC torácico<sup>(6,7)</sup>. Habitualmente, en base a estas, el cirujano predice el número de barras necesarias para conseguir una corrección óptima, y determina cuál es el espacio o espacios intercostales más indicados para la inserción de la barra o barras, según los puntos de máxima proyección anterior del tórax<sup>(4,7)</sup>.

Una vez definida la configuración de barra definitiva, esta se moldea manualmente reproduciendo el *phantom* diseñado intraoperatoriamente sobre material protésico biocompatible. El éxito de la cirugía, por tanto, radica en la experiencia del cirujano y de la evaluación intraoperatoria<sup>(1,7,8)</sup>.

En caso de corrección insuficiente o resultado estético insatisfactorio, puede ser necesaria la retirada de la barra de Nuss, remodelado de la misma y nueva reinserción intratorácica, con el consiguiente incremento del tiempo<sup>(8)</sup> y del riesgo potencial quirúrgico<sup>(1,9)</sup>.

En los últimos años, la impresión tridimensional ha experimentado un rápido avance en medicina, permitiendo crear estructuras 3D casi ilimitadas con una exactitud milimétrica en función de la calidad de la imagen y la tecnología elegida<sup>(10)</sup>, y con gran variedad de materiales, incluidos metales, plásticos e incluso células vivas<sup>(11)</sup>. Los modelos anatómicos impresos en 3D son útiles tanto en la planificación preoperatoria como en la asistencia quirúrgica, y se han convertido en una herramienta educativa útil para la formación del paciente y la enseñanza médica<sup>(10,11)</sup>. Sin embargo, en la actualidad, la literatura en la cirugía de las malformaciones torácicas y del PE sigue siendo escasa<sup>(1,2,8,9,12-14)</sup>.

El objetivo de este trabajo es evaluar la utilidad del diseño, simulación e impresión 3D de barras de Nuss personalizadas para cada paciente, de forma prequirúrgica.

## MATERIAL Y MÉTODOS

Se realizó un estudio descriptivo longitudinal prospectivo, incluyendo a todos los pacientes con PE tributarios de



**Figura 1.** Reconstrucción 3D de la pared costal anterior del TC diagnóstico y simulación de la barra de Nuss en vista axial (arriba) y frontal (abajo).

intervención quirúrgica que aceptaron participar en el estudio, durante el periodo de tiempo comprendido entre junio y diciembre de 2019.

Se recogieron las variables demográficas: sexo, edad, peso, altura e IMC. Y las variables referentes a la patología: antecedente de intervención previa de PE (No-Sí), índice de Haller (mediante TC prequirúrgico), índice de corrección (mediante TC prequirúrgico), ecocardiograma (normal-patológico), espirometría (normal-patológica), tiempo quirúrgico (min), nº de barras introducidas, nº de barras que precisan retirada y reintroducción, complicaciones intraquirúrgicas y complicaciones durante el ingreso.

### Diseño, simulación e impresión 3D

La adquisición del TC diagnóstico se realizó con el *Somatom Emotion CT* con las siguientes características: un grosor de corte mínimo de 0,625 mm (1 mm como máximo), cortes contiguos o superpuestos (no se permiten huecos), tamaño de matriz de 512 × 512, tamaño de vóxel de 0,6, núcleo de región anatómica por defecto (resolución estándar o alta), 90-120 kVp.

De forma prequirúrgica, y en base a las características físicas y el TC diagnóstico de cada paciente, se decidió el número de barras de Nuss necesarias y el espacio intercostal más óptimo para la inserción torácica (siendo este el punto de mayor depresión antero-posterior del tórax, a excepción de la apófisis xifoides).

A partir del TC, se inició el proceso de segmentación del tejido óseo con el fin de generar las partes de parrilla costal y esternón a escala real, aptos para el diseño. La segmentación específica de las regiones de interés se realizó con el programa *Mimics 21.0* (Mimics Innovation Suite, Materialise MV, Bélgica) con las opciones: 1) umbralización (>226 UH), 2) algoritmo de crecimiento de la región y 3) correcciones manuales. Los archivos de volumen de malla se transfirieron al software de diseño *3-matic 13.0* (Mimics Innovation Suite,



**Figura 2.** Impresión 3D en tamaño real de la pared costal anterior del paciente y la barra de Nuss simulada. Vista axial.

Materialise MV, Bélgica) para planificar el tamaño y diseño de la barra de Nuss con la corrección morfológica más óptima posible de forma teórica (Fig. 1).

El modelo de barra simulada resultante se imprimió en tamaño real, sobre material PLA (ácido poliláctico) con la impresora 3D *Ultimaker S5*; *Ultimaker B.V.*; Utrecht, the Netherlands (Fig. 2).

Posteriormente, se reprodujo manualmente el modelo de barra simulado en 3D sobre la barra de Nuss de titanio (Fig. 3). Y finalmente, la barra de Nuss personalizada, se esterilizó a 134°C en autoclave (Matachana) y se reservó hasta la cirugía.

El precio de la segmentación y tratamiento de la imagen para la obtención del modelo anatómico del tórax, junto con el diseño de la barra de Nuss 3D fue de 300 €/unidad. La impresión del modelo resultante en PLA de 100 €/unidad.

### Procedimiento quirúrgico

El procedimiento quirúrgico se desarrolló según la técnica de Nuss, con pequeñas modificaciones de la técnica habitual que se aplican en nuestro centro, como la elevación esternal prequirúrgica. A nivel del punto de mayor hundimiento esternal se colocó un punto de sutura metálica con tracción al cémit, con el objetivo de aumentar el espacio subesternal durante la disección mediastínica.

Bajo anestesia general se realizó bilateralmente una incisión cutánea de 2 cm en la confluencia entre el reborde pectoral y la línea axilar media. Se disecó el plano subcutáneo (realizando un “bolsón subcutáneo”) y el plano muscular, localizando el espacio intercostal más idóneo para la colocación de la barra de Nuss, en este caso, según el diseño de la planificación 3D.

Se insertó un trocar de 5 mm a través de la incisión cutánea derecha, por el espacio intercostal inmediatamente inferior al elegido para la barra, a través del cual se introdujo el toracoscopio. Bajo control videotoroscópico se realizó la disección mediastínica con disector-espada hasta la incisión del hemitórax contralateral. Una vez realizada la disección subesternal, se anudó una cinta al extremo distal del disector-espada y se retiró el mismo, dejando la cinta como guía.



**Figura 3.** Barra de Nuss de titanio moldeada reproduciendo la forma exacta de la barra simulada e impresa en 3D. Vista axial.



**Figura 4.** Resultado final de la cirugía tras la corrección del PE asistida con planificación 3D.

La barra de Nuss, previamente moldeada y esterilizada (personalizada para el paciente), se anudó a un extremo de la cinta guía y se traccionó de la cinta en sentido contrario, hasta conseguir visualizar el extremo proximal de la barra de Nuss a través del paso subesternal. Una vez introducida la barra fue rotada 180° consiguiendo, en el acto, la corrección morfológica del PE.

Posteriormente se introdujo un estabilizador en cada “bolsón subcutáneo” y se suturó con puntos reabsorbibles 2-0. En nuestro centro se utilizan siempre 2 estabilizadores.

En caso de precisar más barras de Nuss se hubiera repetido el procedimiento.

Al finalizar, se retiró el punto de sutura esternal y el trócar, colocando un tubo de drenaje torácico en sello de agua para evacuar el neumotórax, y se cerró por planos (Fig. 4).

### RESULTADOS

Se recogieron un total de 6 pacientes, el 100% de los pacientes intervenidos durante el proceso de inclusión. Los datos demográficos y el resto de variables referentes a la patología se detallan en la tabla I.

La mediana de edad de los pacientes fue de 15 años (rango intercuartil 14,25-15,25 años). La mediana del índice de Haller fue de 4,05 (rango intercuartil 3,5-4,49), y el índice de corrección de 35,9% (rango intercuartil 33,86-38,48%).

Se introdujo una única barra de Nuss en todos los casos, sin precisar retirada ni recolocación de la misma. La mediana

**Tabla I. Variables demográficas y patológicas recogidas.**

Paciente	Edad	Sexo	Peso (kg)	Altura (cm)	IMC	I.H.	I.C.	Tiempo qx. (min)	Ecocardiograma	Espirometría	Nº barras	Cirugía previa	Comp. intraquirúrgicas	Comp. ingreso
P1	13	Varón	43	163	16,18	4,55	47,10%	72	Normal	Normal	1	Sí <sup>1</sup>	No	No
P2	15	Varón	70	175	22,86	3,4	36,12%	103	Normal	Normal	1	No	No	No
P3	14	Varón	44	165	16,16	3,02	22,58%	85	Normal	Normal	1	No	Sí <sup>2</sup>	No
P4	19	Varón	40	168	14,13	5,2	37,84%	68	Patológico <sup>3</sup>	Normal	1	No	No	No
P5	16	Varón	54	169	18,91	3,8	33,11%	74	Normal	Normal	1	No	No	No
P6	15	Varón	51	165	18,73	4,3	38,69%	90	Normal	Normal	1	No	No	No

<sup>1</sup>Taulinoplastia<sup>(15)</sup>.

<sup>2</sup>Perforación transfixiva de 4 mm en LII, con sangrado autolimitado, que no requiere tratamiento adicional.

<sup>3</sup>Válvula aórtica trivalva funcionalmente bivalva.

IMC: índice de masa corporal; I.H.: índice de Haller; I.C.: índice de corrección; qx.: tiempo quirúrgico; Comp.: complicaciones intraquirúrgicas; Comp. Ingreso: complicaciones durante el ingreso.

del tiempo quirúrgico fue de 82 minutos (rango intercuartil 72,5-103 min).

Como complicaciones intraquirúrgicas se registró una perforación transfixiva a nivel distal, de 4 mm, en la línula del pulmón izquierdo, en el paciente nº 3, con sangrado autolimitado, que no requirió tratamiento adicional (no fuga aérea). No se registró ninguna complicación postquirúrgica durante el periodo de seguimiento (12 meses post-intervención).

La corrección morfológica fue valorada de forma subjetiva por todo el equipo quirúrgico, el propio paciente y sus padres. Fue registrada como muy satisfactoria en todos los casos.

## DISCUSIÓN

Al observar las barras simuladas mediante 3D llama la atención la forma tan angulosa que presentan, siendo habitualmente moldeadas con unos ángulos mucho menos marcados. Este hecho es atribuible al diseño específico sobre la parrilla costal, siendo el resultado de su entrada y salida en el tórax. Sin embargo, tras la inserción y rotación de las mismas, se percibe una sensación de mayor ajuste dentro de la caja torácica y de una óptima corrección del defecto estético.

La simulación 3D no altera ni modifica el procedimiento quirúrgico estándar, con lo que no supone un desafío quirúrgico añadido, mientras que sí aporta seguridad al cirujano, siendo muy útil en aquellos casos menos experimentados con la técnica quirúrgica. Especialmente teniendo en cuenta que con la técnica habitual, el éxito de la cirugía depende en gran medida de la experiencia y el arte de moldear la barra del propio cirujano.

Por otra parte, el proceso de simulación, impresión y moldeado de la barra se realiza sin necesidad de aumentar la carga asistencial, al no precisar visitas o pruebas complementarias extra. Asimismo, el reducido precio del material de impresión no representa un importante incremento del coste económico

de la cirugía; mientras que sí puede suponer una reducción del tiempo quirúrgico, al evitar el proceso de moldeado de la barra intraquirúrgico, y al reducir el riesgo de precisar retirada y reinsertación o recolocación de la misma. Estos últimos hechos representan importantes ventajas en cuanto a seguridad del paciente, reduciendo el tiempo anestésico y el riesgo potencial de complicaciones intraquirúrgicas derivadas de la necesidad de retirada y reinsertación de la barra por corrección subóptima.

Si bien la mayoría de nuestros pacientes afectados de PE son varones con un bajo IMC, la simulación 3D diseña la forma de la barra directamente sobre la parrilla costal, omitiendo el tejido muscular y subcutáneo. Por lo que creemos que puede suponer una gran ventaja en pacientes niñas con desarrollo de las glándulas mamarias o bien en aquellos pacientes (menos frecuentes) con mayor panículo adiposo subcutáneo.

Por ello, concluimos que el diseño prequirúrgico de la barra de Nuss, mediante forma y tamaño personalizado y ajustado a cada paciente, facilita la planificación del procedimiento quirúrgico. A su vez, permite conseguir la corrección morfológica más óptima y precisa posible, según la anatomía del paciente (mediante TC o RMN), disminuyendo el riesgo de precisar recolocación de la barra (por corrección subóptima) y, por ende, de complicaciones quirúrgicas.

Por último, cabe señalar las limitaciones del estudio. En primer lugar y como limitación principal, se debe mencionar que se trata de una experiencia inicial, con un escaso número de pacientes reclutados (n = 6). Así mismo, con el objetivo de reducir la extensión del TC torácico diagnóstico al mínimo imprescindible (y con ello la cantidad de irradiación), se dispone de pocas referencias anatómicas externas que permitan correlacionar la posición exacta de la barra de Nuss simulada, de forma precisa, con la posición final real. Finalmente, el tiempo quirúrgico total puede verse modificado por aspectos ajenos a la técnica quirúrgica, como los dependientes del procedimiento anestésico, preparación del paciente, etc. que pueden influir en el análisis del tiempo.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Huang Y-J, Lin K-H, Chen Y-Y, Wu T-H, Huang H-K, Chang H, et al. Feasibility and Clinical Effectiveness of Three-Dimensional Printed Model-Assisted Nuss Procedure. *Ann Thorac Surg.* 2019; 107: 1089-96.
2. Wang L, Guo T, Zhang H, Yang S, Liang J, Guo Y, et al. Three-dimensional printing flexible models: a novel technique for Nuss procedure planning of pectus excavatum repair. *Ann Transl Med.* 2020; 8: 110.
3. Sharma G, Carter YM. Pectus Excavatum. StatPearls. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2020.
4. Nuss D, Kelly RE Jr, Croitoru DP, Katz ME. A 10-year review of a minimally invasive technique for the correction of pectus excavatum. *J Pediatr Surg.* 1998; 33: 545-52.
5. Nuss D, Obermeyer RJ, Kelly RE. Nuss bar procedure: past, present and future. *Ann Cardiothorac Surg.* 2016; 5: 422-33.
6. Lai J-Y, Wang C-J, Chang P-Y. The measurement and designation of the pectus bar by computed tomography. *J Pediatr Surg.* 2009; 44: 2287-90.
7. Xie L, Cai S, Xie L, Chen G, Zhou H. Development of a computer-aided design and finite-element analysis combined method for customized Nuss bar in pectus excavatum surgery. *Sci Rep.* 2017; 7: 3543.
8. Lin K-H, Huang Y-J, Hsu H-H, Lee S-C, Huang H-K, Chen Y-Y, et al. The Role of Three-Dimensional Printing in the Nuss Procedure: Three-Dimensional Printed Model-Assisted Nuss Procedure. *Ann Thorac Surg.* 2018; 105: 413-7.
9. Matsuo N, Matsumoto K, Taura Y, Sakakibara Y, Taniguchi D, Takagi K, et al. Initial experience with a 3D printed model for preoperative simulation of the Nuss procedure for pectus excavatum. *J Thorac Dis.* 2018; 10: E120-4.
10. Andrés-Cano P, Calvo-Haro JA, Fillat-Gomà F, Andrés-Cano I, Pérez-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: 138-51.
11. Wixted CM, Peterson JR, Kadakia RJ, Adams SB. Three-dimensional Printing in Orthopaedic Surgery: Current Applications and Future Developments. *J Am Acad Orthop Surg Glob Res Rev.* 2021; 5: e20.00230-11.
12. Martínez J, Toselli L, Aleixandre CG, Bellía-Munzón G, Sanjurjo D, Peirano MN, et al. Surgical planning, simulation, and prostheses customization for complex chest wall malformations. *Ann Thorac Surg.* 2021. doi: 10.1016/j.athoracsur.2021.01.084
13. Deng X, Huang P, Luo J, Wang J, Yi L, Yang G, et al. A novel three-dimensional printed vacuum bell for pectus excavatum treatment: a preliminary study. *J Cardiothorac Surg.* 2020; 15: 240.
14. Bellía-Munzón G, Martínez J, Toselli L, Nazar Peirano M, Sanjurjo D, Vallee M, et al. From bench to bedside: 3D reconstruction and printing as a valuable tool for the chest wall surgeon. *J Pediatr Surg.* 2020; 55: 2703-9.
15. Bardají C, Cassou L. Taulinoplasty: the traction technique-a new extrathoracic repair for pectus excavatum. *Ann Cardiothorac Surg.* 2016; 5: 519-22.