



UNIVERSIDAD
DE MURCIA

Escuela
de Doctorado

TESIS DOCTORAL

*Modelo de predicción de la cirugía hepática
laparoscópica de los segmentos 7 y 8 basado en
Inteligencia Artificial.*

AUTORA D^a. Irene Herrero Muñoz

DIRECTORES D. Víctor López López
D. Ricardo Robles Campos

2025



UNIVERSIDAD
DE MURCIA

Escuela
de Doctorado

TESIS DOCTORAL

*Modelo de predicción de la cirugía hepática
laparoscópica de los segmentos 7 y 8 basado en
Inteligencia Artificial.*

AUTORA D^a. Irene Herrero Muñoz

DIRECTORES D. Víctor López López
D. Ricardo Robles Campos

2025



**DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD DE LA TESIS PRESENTADA
PARA OBTENER EL TÍTULO DE DOCTOR/A**

Aprobado por la Comisión General de Doctorado el 19 de octubre de 2022.

Yo, D^{ña}. Irene Herrero Muñoz, habiendo cursado el Programa de Doctorado Ciencias de la Salud de la Escuela Internacional de Doctorado de la Universidad de Murcia (EIDUM), como autor/a de la tesis presentada para la obtención del título de Doctor/a titulada:

Modelo de predicción de la cirugía hepática laparoscópica de los segmentos 7 y 8 basado en Inteligencia Artificial.

y dirigida por:

D.: Víctor López López

D.: Ricardo Robles Campos

D.:

DECLARO QUE:

La tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la Ley de Propiedad Intelectual (R.D. legislativo 1/1996, de 12 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual, modificado por la Ley 2/2019, de 1 de marzo, regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita, cuando se han utilizado sus resultados o publicaciones.

Del mismo modo, asumo ante la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad del contenido de la tesis presentada, en caso de plagio, de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Murcia, a 21 de Agosto de 2025

(firma)

Información básica sobre protección de sus datos personales aportados:	
Responsable	Universidad de Murcia. Avenida teniente Flomesta, 5. Edificio de la Convalecencia. 30003; Murcia. Delegado de Protección de Datos: dpd@um.es
Legitimación	La Universidad de Murcia se encuentra legitimada para el tratamiento de sus datos por ser necesario para el cumplimiento de una obligación legal aplicable al responsable del tratamiento. art. 6.1.c) del Reglamento General de Protección de Datos
Finalidad	Gestionar su declaración de autoría y originalidad
Destinatarios	No se prevén comunicaciones de datos
Derechos	Los interesados pueden ejercer sus derechos de acceso, rectificación, cancelación, oposición, limitación del tratamiento, olvido y portabilidad a través del procedimiento establecido a tal efecto en el Registro Electrónico o mediante la presentación de la correspondiente solicitud en las Oficinas de Asistencia en Materia de Registro de la Universidad de Murcia

Esta DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD debe ser insertada en la quinta hoja, después de la portada de la tesis presentada para la obtención del título de Doctor/a.

Código seguro de verificación: RUxFMk5B-vSww0To8-II0o6Gt7-TAEKyQdw

COPIA ELECTRÓNICA - Página 1 de 1

Esta es una copia auténtica imprimible de un documento administrativo electrónico archivado por la Universidad de Murcia, según el artículo 27.3 c) de la Ley 39/2015, de 1 de octubre. Su autenticidad puede ser contrastada a través de la siguiente dirección: <https://sede.um.es/validador/>



*“Esto es lo maravilloso del ser humano:
nunca se desalienta ni se disgusta lo suficiente
como para abandonar algo que debe hacer”.*

Fahrenheit 451

AGRADECIMIENTOS

No hay otra forma si no comenzar agradeciendo a mi familia, a mis padres y a mi hermana, por su apoyo incondicional, poder contar con ellos en todo momento, por su esfuerzo y su dedicación, que han sido fundamentales en esta etapa. Por haber vivido juntos momentos difíciles que me han hecho ser cómo soy. Principalmente agradecer y dedicar esta tesis a mi hermana, por ser un ejemplo desde la infancia de trabajo, constancia y generosidad, y con los años seguir demostrando una fuerza por estar y ser mejor, por superarse, que inspira a los demás, aunque a veces uno mismo no es consciente de ello.

Igualmente a mis amigas que son esa red en la que siempre uno puede caer para levantarse otra vez, y a las nuevas personas que van apareciendo en mi vida y me ayudan a ser mejor.

A todos mis compañeros de residencia con los que he tenido la suerte de poder trabajar y formarme. Gracias por enseñarme a no rendirse y acompañarme en este camino, bonito pero no siempre fácil, y por seguir estando presentes en lo que queda de él.

A todo el equipo de cirugía hepática del Hospital Clínico Universitario Virgen de la Arrixaca, por hacerme sentir como una más durante el tiempo que estuve con ellos. Fue un honor y significó tanto para mí que motivó la trayectoria profesional que quiero seguir, ya que me enseñaron no sólo teoría, si no una vocación por esta especialidad. Especialmente a Víctor López, al que admiro, por su confianza al ofrecerme la oportunidad de realizar la tesis doctoral bajo su tutela y aprender tanto a su lado, por su paciencia y disposición.

A la cirugía, por haber sido una de las decisiones más difíciles, pero con el tiempo haberme demostrado que merece la pena y poder decir con orgullo que me gusta lo que hago.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	19
ÍNDICE DE GRÁFICAS Y TABLAS	23
ABREVIATURAS	27
RESUMEN	31
ABSTRACT.....	37
I. INTRODUCCIÓN	41
1. Anatomía hepática	43
1.1. Anatomía básica del hígado	43
1.2. Vascularización hepática y vía biliar.....	45
1.2.1. Vena porta.....	45
1.2.2. Arteria hepática.....	46
1.2.3. Venas hepáticas.....	47
1.2.4. Vía biliar	48
1.2.5. Pedículo hepático.....	49
1.3. Anatomía funcional del hígado	53
1.3.1. Segmentos hepáticos	55
1.4. Anatomía quirúrgica y tipos de resecciones hepáticas	57
2. Evolución de la cirugía hepática mínimamente invasiva	64
2.1. Cirugía laparoscópica	64
2.1.1. Beneficios de la cirugía laparoscópica.....	65
2.1.2. Inconvenientes de la cirugía laparoscópica.....	66
2.1.3. Evolución de la cirugía hepática laparoscópica.....	67
2.1.4. Indicaciones y resultados de la cirugía hepática laparoscópica	73
2.1.4.1. Tumores hepáticos benignos	74
2.1.4.2. Metástasis hepáticas de cáncer colorrectal	74
2.1.4.3. Hepatocarcinoma	77
2.1.4.4. Colangiocarcinoma intrahepático	78
2.1.4.5. Colangiocarcinoma perihiliar	79

2.1.4.6. Trasplante hepático	80
2.1.5. Cirugía laparoscópica de los segmentos difíciles	80
2.2. Cirugía robótica	85
3. Inteligencia artificial en cirugía.....	87
3.1. Qué es la inteligencia artificial.....	87
3.2. Modelos de IA	88
3.3. IA en medicina.....	92
3.3.1. Aplicaciones de la IA en medicina.....	94
3.3.2. IA en hepatología	96
3.4. IA en cirugía	100
3.4.1. IA en cirugía hepática.....	105
3.5. Ética y perspectivas futuras.....	111
II. JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	115
III. MATERIAL Y MÉTODOS	119
1. Diseño del estudio	121
2. Ámbito del estudio.....	121
3. Población diana y población de estudio.....	122
4. Periodo de estudio	123
5. Criterios de inclusión y exclusión.....	123
6. Cálculo del tamaño muestral	123
7. Descripción de la intervención.....	124
8. Financiación de la investigación	124
9. Personal necesario para la investigación.....	124
10. Descripción del modelo	125
10.1. Explicación de parámetros de error para la evaluación del modelo.....	125
10.2. Desarrollo de los modelos de IA.....	126
10.3. Configuración y evaluación de los modelos de IA.....	128
11. Variables del estudio	130
11.1. Variables sociodemográficas.....	131
11.2. Variables relacionadas con la lesión.....	133
11.3. Variables relacionadas con la cirugía	134

11.4. Variables relacionadas con el postoperatorio	134
12. Recogida de datos	135
13. Consideraciones éticas y permisos	136
14. Análisis estadístico.....	136
IV. RESULTADOS	139
1. Variables.....	141
1.1. Variables sociodemográficas.....	141
1.2. Variables intraoperatorias y postoperatorias	142
2. Panel interactivo de predicción	143
3. Predicción de la complejidad de la cirugía	144
4. Predicción de los resultados postoperatorios	149
5. Interpretación de la predicción.....	152
6. Análisis de conversión a cirugía abierta	153
V. DISCUSIÓN.....	159
1. Influencia de la IA en cirugía.....	161
1.1. Detección, diagnóstico y planificación quirúrgica en cirugía hepática	164
1.2. Predicción de resultados en cirugía hepática	167
2. Aplicabilidad de los modelos de IA.....	169
3. Nuestros modelos.....	171
4. Nuestros resultados.....	172
4.1. Factores relacionados con la complejidad de la cirugía.....	173
4.2. Factores relacionados con los resultados de la cirugía.....	175
4.3. Factores relacionados con la conversión a cirugía abierta	176
5. Futuro	179
VI. CONCLUSIONES.....	13
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	187
VIII. ANEXOS	201
Anexo 1. Artículo publicado sobre nuestro estudio en Surgical Endoscopy.....	203

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Morfología hepática: visión anterior y visión caudal	44
Figura 2. Puntos de referencia anatómicos (visión anterior) y las seis “puertas” (visión caudal) para el aislamiento extrahepático del pedículo glissoniano.....	52
Figura 3. Planos de división del hígado en cuatro secciones en base al trayecto de las venas suprahepáticas.	53
Figura 4. Planos de división del hígado en ocho segmentos en base al trayecto de las venas suprahepáticas y la bifurcación portal	55
Figura 5. División en tres “cone unit” del segmento 5	61
Figura 6. En el abordaje laparoscópico lateral, los puertos intercostales (transdiafragmáticos) junto a la movilización completa del hígado, pueden permitir el abordaje directo lateral y a los tumores localizados en segmentos posterosuperiores	81
Figura 7. Posibles abordajes para los segmentos posterosuperiores (PS) en la resección hepática laparoscópica	82
Figura 8. Representación esquemática de los diferentes términos y algoritmos de IA, y posibles escenarios de aplicación de los mismos (en esta figura en relación al hepatocarcinoma).....	91
Figura 9. Imágenes médicas en las que se aplica el aprendizaje profundo	95
Figura 10. Modelo virtual 3D del hígado en el que se muestra el parénquima hepático, estructuras vasculares, biliares, y una lesión.	107
Figura 11. El sistema de navegación muestra en el mismo monitor imágenes de ecografía intraoperatoria (A), imágenes de reconstrucción multiplanar de TC (B) y RM (C) e imágenes tridimensionales del hígado (D), con las distintas estructuras resaltadas en color, así como las estructuras a resecar mediante una simulación preoperatoria.....	108
Figura 12. Resultados de la predicción del sistema de IA. (a, c) Estructura original de los casos 1 y 2. (b, d) Predicción por el modelo de IA.....	110

Figura 13. Metodología seguida para la configuración y evaluación de los modelos de IA.....	129
Figura 14. Panel interactivo para la predicción de nuevos casos.....	130
Figura 15. Calculadora de predicción de nuevos casos creada con SHAP.....	144
Figura 16. Importancia de cada variable para la predicción de la complejidad de la cirugía mediante el modelo MLP.....	146
Figura 17. Representación de ejemplos según los valores de cada variable introducida en la calculadora.....	148
Figura 18. Importancia de cada variable para la predicción de los resultados de la cirugía mediante el modelo Random Forest.....	150
Figura 19. Representación de ejemplos según los valores de cada variable introducida en la calculadora.....	151
Figura 20. Distribución de cada variable categórica por conversión a cirugía abierta.....	154
Figura 21. Distribución de cada variable numérica por conversión a cirugía abierta.....	157

ÍNDICE DE GRÁFICAS Y TABLAS

GRÁFICAS

Gráfica 1. Porcentaje de pacientes según la clasificación ASA.....	141
Gráfica 2. Porcentajes de cada indicación quirúrgica	142

TABLAS

Tabla 1. Terminología de Brisbane 2000. Anatomía y resecciones hepáticas.....	58
Tabla 2. Clasificación de la OMS en función del IMC	132
Tabla 3. Parámetros y valores empleados para la clasificación Child-Pugh	133
Tabla 4. Clasificación Clavien-Dindo.....	135
Tabla 5. Rendimiento obtenido por la mejor configuración de cada modelo en la validación cruzada de 10 pliegues para predecir la complejidad de la cirugía.....	145
Tabla 6. Rendimiento obtenido por la mejor configuración de cada modelo en la validación cruzada de 10 pliegues para predecir los resultados postoperatorios..	149
Tabla 7. Resultados de la prueba Chi-cuadrado para las variables categóricas en función de la conversión a cirugía abierta	155
Tabla 8. Medias y resultados de la prueba U de Mann-Whitney para las variables numéricas en función de la conversión a cirugía abierta.....	158

ABREVIATURAS

AFP:	alfa-fetoproteína
ASA:	American Society of Anesthesiologists
BCLC:	Barcelona Clinic Liver Cancer
CCR:	cáncer colorrectal
HALS:	hand-assisted laparoscopic surgery (cirugía laparoscópica asistida con la mano)
HCC:	hepatocarcinoma
IA:	inteligencia artificial
ICG:	indocyanine green (verde indocianina)
IMC:	índice de masa corporal
MAE:	mean absolute error (error absoluto medio)
MHCCR:	metástasis hepáticas de cáncer colorrectal
MLP:	multilayer perceptron (perceptrón multicapa)
MSE:	mean square error (error medio cuadrático)
OMS:	Organización Mundial de la Salud
PET:	positron emission tomography (tomografía por emisión de positrones)
QT:	quimioterapia
RM:	resonancia magnética
RMSE:	root mean square error (raíz del error medio cuadrático)
SHAP:	SHapley Additive exPlanations
TC:	tomografía computarizada
VCI:	vena cava inferior

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

La cirugía hepática laparoscópica es una especialidad que ha experimentado un progreso significativo en los últimos años, acorde a los avances en los conocimientos anatómicos y funcionales del hígado, así como a los avances tecnológicos. Los beneficios de este tipo de abordaje son conocidos, pero también presenta desventajas. Algunas de ellas son la restricción de los movimientos, la falta de una adecuada visión espacial reducida a un campo quirúrgico más limitado, o la falta de sensación táctil. Existen otros factores que condicionan los resultados como el tamaño y la localización del tumor, o la extensión de la resección hepática. A este respecto, la cirugía de los segmentos posterosuperiores continúa siendo uno de los procedimientos más desafiantes. Actualmente existen diversos scores para predecir sus resultados a partir de ciertas variables. En este sentido, la inteligencia artificial (IA) se ha convertido en una herramienta útil para la creación de modelos de predicción y para la toma de decisiones, mediante el desarrollo de algoritmos de riesgo personalizados, con el fin de elegir el tratamiento más adecuado en cada caso.

OBJETIVOS

El objetivo de este estudio fue analizar y desarrollar un modelo de IA que demostrara utilidad para la predicción de la complejidad y resultados postoperatorios de la cirugía hepática laparoscópica de los segmentos 7 y 8, en función de determinadas características de cada paciente y de cada lesión, con el fin de ayudar en la toma de decisiones en las intervenciones de estos segmentos complejos. El objetivo secundario fue predecir qué intervenciones iban a precisar conversión a cirugía abierta.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se recogieron los datos de 585 pacientes sometidos a cirugía hepática de los segmentos 7 y 8 mediante abordaje mínimamente invasivo, procedentes de 19 centros especializados a nivel internacional, con el fin de desarrollar un modelo de IA capaz de predecir la complejidad y los resultados de cada intervención quirúrgica en función de determinadas variables.

La complejidad y los resultados de la cirugía se predijeron utilizando modelos de IA tras el análisis de las variables, agrupadas en función de cada uno de esos objetivos de estudio. Se analizaron distintos modelos y sus parámetros eligiendo el mejor modelo entrenado a través de un conjunto de entrenamiento y evaluado en un conjunto de prueba.

Se aplicó el método SHapley Additive exPlanations (SHAP) para facilitar la interpretación de dichos modelos, revelando la importancia de cada variable y su contribución a las predicciones. Se creó una aplicación interactiva para realizar predicciones de cada caso de forma individualizada, y reflejar de forma visual la contribución de las variables y su aplicabilidad a un escenario real.

RESULTADOS

Para realizar la predicción de la complejidad el modelo que obtuvo el mejor rendimiento tras el ajuste de hiperparámetros fue el perceptrón multicapa (multilayer perceptron –MLP–). Según este modelo, el tipo de resección es la variable más importante para la predicción de la complejidad de la cirugía, siendo las siguientes más relevantes el tamaño de la lesión más grande y el índice de comorbilidad de Charlson.

El mejor rendimiento para predecir los resultados de la cirugía se obtuvo con el modelo Random Forest. En este caso, el tipo de resección y el tamaño de la lesión más grande vuelven a ser las dos variables más importantes, siendo la edad la tercera variable con mayor relevancia.

En cuanto al análisis de las variables relacionadas con el riesgo de conversión a cirugía abierta, para las variables categóricas, la localización del tumor obtuvo diferencias significativas en su distribución con una mayor proporción de conversión para las lesiones del segmento 7. De las variables numéricas, mostraron diferencias las variables de pérdidas hemáticas, las complicaciones y el tiempo quirúrgico.

CONCLUSIONES

Nuestro estudio demuestra que la IA puede generar modelos predictivos precisos para la cirugía hepática laparoscópica de los segmentos 7 y 8, considerando características del pa-

ciente y de la lesión. Estos pueden emplearse para asistir en la toma de decisiones, mejorar la planificación quirúrgica y reducir los riesgos. Además, identificamos factores que aumentan la probabilidad de conversión a cirugía abierta, como la ubicación del tumor en el segmento 7, el sangrado, las complicaciones y la duración de la cirugía.

PALABRAS CLAVE: cirugía hepática, laparoscopia, inteligencia artificial, modelos de predicción, complejidad, resultados, conversión.

ABSTRACT

INTRODUCTION

Laparoscopic liver surgery is a medical specialty that has made significant progress in recent years, consistent with advances in anatomical and functional knowledge of the liver, as well as technological developments. The benefits of this approach are well known, but it also presents disadvantages. Some of them include restricted movements, limited spatial vision within a smaller surgical field, and the absence of tactile feedback. Other factors that influence the outcomes include the size and location of the tumor, or the extent of the liver resection. In this regard, surgery of the posterosuperior segments continues to be one of the most challenging procedures. Currently, there are various scores to predict its outcomes based on certain variables. In this context, artificial intelligence (AI) has emerged as a useful tool for developing predictive models and supporting decision-making, by creating personalized risk algorithms aimed at selecting the most appropriate treatment in each case.

AIMS

The objective of this study was to analyze and develop an AI model useful for predicting the complexity and postoperative outcomes of laparoscopic liver surgery of segments 7 and 8, based on specific characteristics of each patient and each lesion, to support decision-making in surgeries involving these challenging segments. The secondary objective was to predict which procedures would require conversion to open surgery.

METHODS

Data were collected from 585 patients who underwent minimally invasive liver surgery of segments 7 and 8, sourced from 19 specialized international centers, with the aim of developing an AI model capable of predicting the complexity and outcomes of each surgical intervention based on specific variables.

Surgical complexity and outcomes were predicted using AI models following the analysis of variables grouped according to each of the study's objectives. Various models and parameters were analyzed, selecting the best-performing model trained on a training set and evaluated on a test set.

The SHapley Additive exPlanations (SHAP) method was applied to enhance interpretability of the models, revealing the importance of each variable and its contribution to the predictions. An interactive application was created to make individualized case predictions and to visually reflect the contribution of the variables and their applicability in real-world clinical scenarios.

RESULTS

To predict surgical complexity, the best-performing model after hyperparameter tuning was the multilayer perceptron (MLP). According to this model, the type of resection was the most important variable for predicting surgical complexity, followed by the size of the largest lesion and the Charlson comorbidity index.

The best performance for predicting surgical outcomes was achieved with the Random Forest model. In this case, the type of resection and the size of the largest lesion were again the two most important variables, with age being the third most relevant factor.

Regarding the analysis of variables associated with the risk of conversion to open surgery, among the categorical variables, tumor location showed significant differences, with a higher conversion rate for lesions located in segment 7. Among the numerical variables, blood loss, complications, and operative time showed significant differences.

CONCLUSIONS

Our study demonstrates that AI can generate accurate predictive models for laparoscopic liver surgery of segments 7 and 8, taking into account both patient and lesion characteristics. These models can be used to assist in clinical decision-making, improve surgical planning, and reduce risks. Additionally, we identified factors associated with a higher likelihood of conversion to open surgery, such as tumor location in segment 7, blood loss, complications, and longer operative time.

KEYWORDS: liver surgery, laparoscopy, artificial intelligence, predictive models, complexity, outcomes, conversion.

I. INTRODUCCIÓN

1. ANATOMÍA HEPÁTICA

1.1. ANATOMÍA BÁSICA DEL HÍGADO

El hígado es un órgano sólido situado en el lado derecho de la cavidad abdominal, en el compartimento supramesocólico, alojado bajo la cúpula diafragmática derecha y cubierto por las costillas. El hígado no patológico tiene un color pardo a nivel macroscópico, y presenta unas fisuras y surcos sobre una superficie lisa brillante debido a que se encuentra rodeado por la cápsula de Glisson, que se trata de una cápsula fibrosa. Su volumen y tamaño es variable, pero se considera un peso aproximado de 1400 gramos en las mujeres y 1800 gramos en los hombres, lo que supone aproximadamente el 2% del peso de una persona adulta¹.

La línea de Cantlie o fisura portal principal^{2, 3} discurre desde la vena cava inferior suprahepática hasta el lecho de la vesícula biliar, dividiendo el hígado funcionalmente en los lóbulos derecho e izquierdo. A nivel intraparenquimatoso, este plano de división entre los dos semihígados está delimitado por la vena suprahepática media.

En la cara inferior hepática encontramos un surco anteroposterior derecho que corresponde a la fosa donde se encuentra alojada la vesícula biliar, y un surco anteroposterior izquierdo por donde penetra el ligamento redondo, encontrando hacia posterior el ligamento venoso de Arancio⁴. Este ligamento es un vestigio fetal que sirve para comunicar la vena umbilical a través de una rama portal izquierda con la vena cardinal posterior derecha (la que será la vena cava inferior). Este conducto venoso de Arancio y la vena umbilical se obliteran en los primeros días de vida. Entre ambos surcos de la cara inferior hepática se sitúa de forma transversal el hilio hepático.

El hígado se mantiene fijo en su posición gracias a la sujeción por varios ligamentos. El ligamento suspensorio o falciforme es un repliegue peritoneal de forma triangular que divide morfológicamente el hígado en lóbulo derecho y lóbulo izquierdo (éste último de menor tamaño, se encuentra aproximadamente a nivel de la unión de los dos tercios derechos del hígado con el tercio izquierdo) [*Figura 1⁴*], y lo sostiene y une al diafragma. Continúa hasta su inserción a nivel de la pared abdominal anterior conformando el ligamento redondo, vestigio de la vena umbilical.

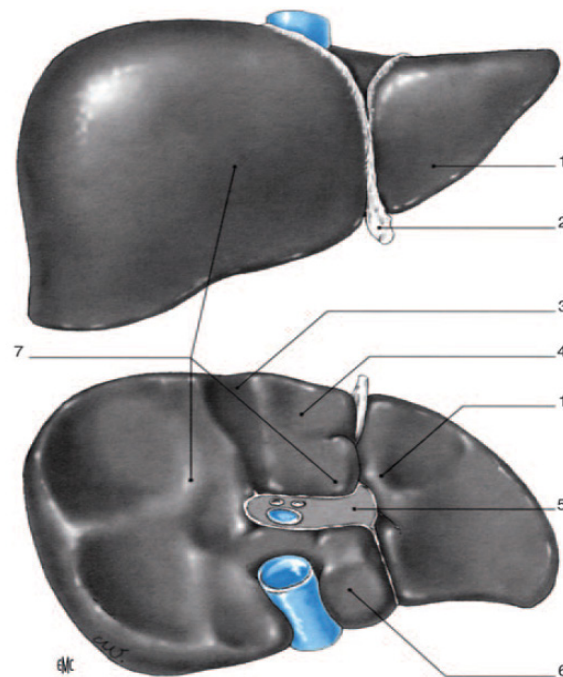


Figura 1^a. Morfología hepática: visión anterior y visión caudal. 1. Lóbulo izquierdo; 2. Ligamento redondo; 3. Lecho vesicular; 4. Lóbulo cuadrado; 5. Hilio hepático; 6. Lóbulo de Spiegel; 7. Lóbulo derecho.

El ligamento coronario se conforma de una lámina anterosuperior que se extiende desde la cara superior del hígado sobre el diafragma, rodeando la vena cava en su zona media, y hacia anterior continuándose con el ligamento falciforme; y una lámina inferior que lo une al peritoneo parietal posterior. En sus extremos laterales ambas láminas se fusionan, formando los ligamentos triangulares derecho e izquierdo.

Encontramos también los ligamentos frenohepático, gastrohepático y hepatoduodenal, con el epiplón menor, así como la sujeción que le aporta la vena cava con las venas suprahepáticas y el propio pedículo hepático, compuesto por vena porta, arteria hepática y vía biliar principal.

En la mayoría de las cirugías hepáticas es imprescindible la liberación de todo el hígado mediante la sección de sus ligamentos suspensores (ligamentos redondo, falciforme, coronario y triangulares). El ligamento redondo debe ligarse y puede servir como elemento de tracción, posteriormente se secciona el ligamento falciforme de anterior hacia posterior hacia las venas suprahepáticas. Primero se realiza la sección del ligamento triangular izquierdo teniendo precaución de evitar lesionar la vena suprahepática izquierda; de esta manera, se libera el

hígado izquierdo para poder luxar el lóbulo hepático izquierdo, y continuar con la sección de los ligamentos. Haciendo maniobra de contratracción con el diafragma podremos seccionar el ligamento coronario (teniendo precaución de no penetrar en el parénquima hepático ni en el diafragma o retroperitoneo) y el ligamento triangular derecho hasta localizar la vena cava inferior infrahepática. Hay que tener en cuenta que durante estas maniobras de movilización se puede producir una rotación o compresión de la vena cava inferior, provocando una disminución del retorno venoso y el gasto cardíaco.

La cirrosis hepática consiste en los cambios producidos por la degeneración y fibrosis del parénquima hepático, presentando macroscópicamente aspecto nodular, aumento de la resistencia del flujo vascular con el consecuente desarrollo de hipertensión portal, y en estadios avanzados, aparición de varices esofágicas, gástricas, recanalización de la vena umbilical, y sus complicaciones a causa de ello. Puede tener múltiples causas. Como consideración, en los pacientes cirróticos severos con circulación colateral, se debe preservar el ligamento redondo.

1.2. VASCULARIZACIÓN HEPÁTICA Y VÍA BILIAR

El hilio hepático está formado por la vena porta, la arteria hepática, y la vía biliar, y se encuentra en la parte inferior derecha del epiplón menor. En el hilio hepático también se encuentran nervios y vasos linfáticos hepáticos.

A nivel extrahepático el hilio se divide en dos pedículos, derecho e izquierdo, para el lóbulo hepático derecho y para el lóbulo izquierdo respectivamente. La parte del parénquima hepático situada por detrás del hilio y el lóbulo caudado recibe vascularización de ramas procedentes de ambos pedículos. La vascularización del hígado proviene de dos orígenes: el 75-80% de la vena porta y el 20-25% de la arteria hepática.

1.2.1. Vena porta

La vena porta dirige al hígado el drenaje venoso del aparato digestivo infradiafragmático, del páncreas y del bazo. Presenta unos 8-10 centímetros de longitud y un calibre de 15-20 milímetros⁴. En términos generales, la vena mesentérica inferior desemboca en

la vena esplénica, la cual, junto a la vena mesentérica superior, van a conformar la vena porta a nivel de la cara posterior del istmo del páncreas. Es la estructura situada más posterior del hilio hepático. La bifurcación de la vena porta sigue la división de las secciones y segmentos hepáticos, determinando cuatro sectores a través de los denominados planos intersectoriales⁵.

El pedículo portal derecho es corto con bifurcación inmediata en dos ramas de segundo orden, una rama anterior y otra posterior (sectores anterior y posterior derechos que coinciden con las secciones derechas de mismo nombre), separadas por la fisura portal derecha (vena suprahepática derecha). Cada una de estas ramas se subdivide en otras dos ramas de tercer orden para cada uno de los segmentos del lóbulo hepático derecho, superiores (segmentos 5 y 8) e inferiores (segmentos 6 y 7).

El pedículo izquierdo es más largo y realiza una curva hacia anterior, terminando en un fondo de saco producido por la terminación del ligamento redondo (receso de Rex). Se divide en tres ramas (4), definiendo tres sectores que son distintos de las dos secciones izquierdas, y son: una rama posterior para el segmento 2, y dos anteriores para los segmentos 2, 3 y 4⁵.

Existen diferentes variantes anatómicas. En el lóbulo izquierdo, podemos encontrar varios pedículos para los segmentos 3 y 4. En el lóbulo derecho las variaciones son más frecuentes. En hasta un 20% de los casos no existe porta derecha propiamente, si no una trifurcación directa de la vena porta en la rama posterior derecha, rama anterior derecha, y porta izquierda. En un 30% no existe pedículo derecho posterior para los segmentos 6 y 7, recibiendo aporte de otras ramas segmentarias.

1.2.2. Arteria hepática

La arteria hepática común es una rama directa del tronco celiaco. Se sitúa en el borde izquierdo de la vena porta. Tras originar la arteria gastroduodenal, continúa en sentido oblicuo ascendente hacia derecha y anterior, convirtiéndose en la denominada arteria hepática propia, que se divide en arteria hepática derecha y arteria hepática izquierda que penetran en el parénquima hepático.

Podemos encontrar otras arterias hepáticas accesorias que van a contribuir al aporte hepático, ya que la variabilidad a nivel de la vascularización arterial hepática es muy amplia. Las variantes más frecuentes son la presencia de una arteria hepática derecha o una arteria hepática izquierda aberrantes². La anatomía más frecuente (Michels I), en hasta un 55% de los pacientes, es que la arteria hepática nazca del tronco celiaco y origina dos arterias, la gastroduodenal y la arteria hepática propia que posteriormente se divide en derecha e izquierda.

En un 10% de los casos la arteria hepática izquierda se origina en la arteria gástrica izquierda (Michels II). En un 11% la arteria hepática derecha nace de la arteria mesentérica superior (Michels III). Estas dos últimas variantes aparecen de forma conjunta en hasta un 11% de la población (Michels IV). Siempre se debe buscar la existencia de una arteria hepática izquierda a nivel del epiplón menor antes de comenzar una cirugía hepática, así como la presencia de una arteria hepática derecha proveniente de la arteria mesentérica superior que discorra por el borde posterior derecho de la vena porta. Menos frecuente, en un 8% de la población, es que la arteria hepática se divida en sus ramas izquierda y derecha, pero exista una rama izquierda accesoria con origen en la arteria gástrica izquierda (Michels V), y en un 7% una rama accesoria derecha de la arteria mesentérica superior (Michels VI). En un 1% aparecen ambas ramas accesorias (Michels VII). En un 4% el lóbulo derecho presenta una arteria proveniente de la arteria mesentérica superior y el izquierdo dos ramas, una de la arteria hepática común y otra de la gástrica izquierda (Michels VIII). En un 4,5% de los pacientes la arteria hepática común sale de la arteria mesentérica superior (Michels IX). Lo menos frecuente, en un 0,5% es que la arteria hepática común se origine de la arteria gástrica izquierda (Michels X) (4)³. Existe también además una alta variabilidad del árbol vascular intrahepático.

Debido a esta inconsistencia anatómica, es altamente recomendable el estudio preoperatorio de la vascularización hepática para conocer estas posibles variantes.

1.2.3. Venas hepáticas

El drenaje venoso del hígado se realiza a través de las tres venas hepáticas o suprahepáticas: derecha, media e izquierda, que confluyen en la vena cava inferior ya fuera del parénquima hepático, en su parte superior.

La vena suprahepática izquierda suele ser corta e intraparenquimatosa. Está adherida por su zona posterior al ligamento de Arancio. Se une al tronco de la vena suprahepática media para formar un tronco común en la mayoría de casos, que en ocasiones recibe además una vena diafragmática inferior izquierda.

La vena suprahepática media discurre por el plano medio del hígado y está formada por dos ramas, derecha e izquierda.

La vena suprahepática derecha es de mayor calibre, pero tronco corto, con entrada a la vena cava a nivel más caudal que la vena suprahepática media. En ocasiones puede estar constituida en realidad por varias venas suprahepáticas derechas que desembocan de forma independiente a la vena cava. En hasta un 20% de los casos existe una vena inferior principal independiente para el drenaje de la región inferior del lóbulo derecho⁴.

Para el abordaje de las venas suprahepáticas, existen varias referencias anatómicas⁶ como las venas diafragmáticas inferiores, el ligamento de Arancio para identificar la raíz de las venas hepáticas media e izquierda, y el ligamento de la vena cava inferior. Para su correcta disección y evitar una posible lesión, se debe tener en cuenta la dirección de cada una de estas venas. El sangrado de las venas hepáticas se puede controlar, en la mayoría de los casos, con compresión, ya que sus presiones son bajas (similar a la presión venosa central).

Las venas suprahepáticas marcan una serie de fronteras anatómicas a nivel del hígado, por lo que en ocasiones se puede delimitar la resección hepática realizando una exposición adecuada y visualización de su raíz, especialmente a nivel de los segmentos superiores (a nivel más inferior, las venas hepáticas comienzan a ramificarse y el plano intersegmentario que delimitan se vuelve difuso).

1.2.4. Vía biliar

Los conductos hepáticos biliares derecho e izquierdo conforman a nivel extrahepático la vía biliar principal o conducto hepático común, situado en la parte derecha del hilio hepático. A nivel de la unión de ambos conductos, encontramos la placa hiliar, que consiste en un engrosamiento de la cápsula de Glisson a este nivel.

El conducto hepático izquierdo se forma por la unión de los conductos de los segmentos 2 y 3, craneal al receso de Rex, por fuera del parénquima hepático. En su trayecto transversal hacia su unión con el conducto hepático derecho recibe varios conductos de los segmentos 1 y 4. El conducto hepático derecho está formado por la unión de los conductos derechos anterior y posterior, también de forma extraparenquimatosa, por encima de la porta derecha. Este conducto es más corto y vertical que el izquierdo.

En la anatomía de la vía biliar también encontramos variabilidad. Puede encontrarse una ausencia del conducto derecho (18%), y por tanto los conductos anterior y posterior derechos van a drenar directamente en el conducto hepático izquierdo. Las variaciones del conducto izquierdo son menos frecuentes⁴.

La vía biliar principal está irrigada sobre todo por arteriolas de la arteria pancreatoduodenal superior derecha, rama de la arteria gastroduodenal, que forman una red anastomótica que discurre de forma paralela por la derecha y por la izquierda de la vía biliar.

El conducto hepático común junto al conducto cístico va a formar el colédoco, que, debido a la variabilidad de su longitud por la inconstante altura de la desembocadura del conducto cístico, en ocasiones es denominado de forma general también vía biliar principal⁴. El conducto colédoco está irrigado por ramas procedentes de la arteria hepática derecha⁷.

1.2.5. Pedículo hepático

La cápsula o vaina de Glisson que rodea el hígado también envuelve de forma conjunta a las estructuras que conforman el hilio hepático (vena porta, arteria hepática propia y conducto hepático).

En el año 1989, Couinaud⁸ describió tres maneras diferentes de abordar este pedículo glissoniano: intrafascial, refiriéndose a la individualización vascular; extrafascial, o abordaje del pedículo en conjunto, pudiendo ser de forma intrahepática penetrando y destruyendo el parénquima hepático de forma superficial o mínima, o extrahepático; y extrafascial y transfi-sural, refiriéndose al abordaje del pedículo tras realizar una transección mayor a través de la fisura umbilical o portal principal.

El denominado abordaje glissoniano fue inicialmente descrito por Tien-Yu-Lin⁹ en 1960 y Ton That Tung en 1963¹⁰. Posteriormente Takasaki en 1986¹¹ realizó una seccionectomía lateral derecha abierta utilizando este abordaje.

El abordaje glissoniano puede ser intra o extrahepático⁶, y se define por el aislamiento anatómico del pedículo glissoniano, independientemente de su orden. El abordaje hiliar se define en cambio por la disección del ligamento hepatoduodenal para exponer, aislar, ligar y dividir la vena porta, la arteria hepática y el conducto biliar de forma individual. En caso de realizar una hepatectomía derecha o izquierda, la disección del hilio con la individualización de cada elemento es la práctica estándar en cirugía abierta siendo cada vez menos utilizado en cirugía laparoscópica.

La maniobra de Pringle¹² propuesta por dicho autor en el año 1908, se utiliza para el control vascular durante la resección hepática, y consiste en el pinzamiento del pedículo hepático en su zona inferior, en bloque con sus tres elementos, realizándose de izquierda a derecha para aplicar la máxima presión sobre la arteria hepática. Para disecar el pedículo hepático se realiza una apertura de la pars flácida del epiplón menor para rodearlo hasta llegar al hiato de Winslow. Esta maniobra puede realizarse de forma continua o intermitente, siendo ésta última lo más habitual, en periodos de 15 minutos (10 minutos en hígados cirróticos) con 5 minutos de despinzamiento. Esta maniobra tiene como objetivo limitar el flujo vascular y así minimizar las pérdidas sanguíneas de origen arterial y portal durante los tiempos de transección hepática. Sin embargo, este recurso no se realiza de manera sistemática o su realización varía en función de los centros; en general, es útil en casos de resecciones parenquimatosas prolongadas o hemorrágicas. También se puede realizar un pinzamiento selectivo del hígado derecho, izquierdo, de una sección o de un segmento hepático. En la medida de lo posible el pinzamiento selectivo es la técnica de elección para evitar la isquemia del parénquima hepático que no se va a resecar.

Cuando se realiza una hepatectomía izquierda o derecha, o incluso en el caso de alguna seccionectomía (en función de la anatomía vascular) esta maniobra puede realizarse de forma extrahepática, aislando y disecando las ramas portal y arterial correspondientes sin necesidad de ocluir la vía biliar; en caso de abordar uno o varios segmentos el abordaje será del pedículo

glissoniano correspondiente. Para los pedículos glissonianos de primer orden se puede realizar un abordaje hiliar o glissoniano, sin embargo, para las divisiones de segundo orden o mayor se recomienda un abordaje glissoniano, debido a la dificultad técnica de realizar un abordaje hiliar (dependiendo de la localización del tumor y la experiencia del cirujano)^{6, 13}.

El abordaje glissoniano es efectivo para abordar los pedículos de tercer orden y realizar segmentectomías regladas. Para los segmentos 1-6, las ramas de sus pedículos glissonianos se localizan cerca del hilio hepático. Las ramas de los pedículos del segmento 7 y 8 se localizan a unos 2 centímetros en profundidad del hilio, encontrándose por detrás de la placa cística y entre el segmento 6 y el proceso caudado¹³. Sin embargo, la disposición de los pedículos glissonianos no siempre es constante.

Para el abordaje del pedículo glissoniano de forma extrahepática, Sugioka et al.¹⁴ propusieron la teoría de las puertas, basándose en puntos de referencia anatómicos a través de los cuales existirían seis “puertas” por las que aislar cada pedículo. Define el abordaje del pedículo de forma extrahepática, sin penetrar en el parénquima, como el procedimiento más adecuado, ya que su aislamiento intrahepático conlleva un potencial riesgo de lesión inadvertida portal o venosa.

En su estudio, se describe la cápsula de Laennec como una membrana fibrosa densa que envuelve no sólo la superficie hepática sino además el parénquima rodeando los pedículos glissonianos, siendo una estructura diferenciada de la propia serosa. Se forma así un espacio avascular entre el pedículo glissoniano y la cápsula de Laennec que puede abordarse de forma extrahepática y permite aislar el pedículo glissoniano sin penetrar en el parénquima. Esto es especialmente útil en la cirugía mínimamente invasiva, aunque algunos autores consideran difícil identificar la cápsula de Laennec. Se debe evitar la rotura de la vaina glissoniana ya que aumenta el riesgo de lesionar los elementos del pedículo, especialmente el conducto biliar; sería preferible penetrar en la cápsula de Laennec y por tanto introducirse en el parénquima alrededor del pedículo antes que en la vaina glissoniana.

Para su estandarización, se describen estas seis “puertas” [*Figura 2¹⁴*] a través de cuatro referencias anatómicas: la placa (placa como parte engrosada fibrótica de la vaina glissoniana) de Arancio, la placa umbilical, la placa cística y el pedículo glissoniano del proceso caudado.

Las puertas son los puntos delimitados por estas referencias anatómicas. Al conectar dos de estas puertas, se puede realizar el aislamiento extrahepático de un pedículo glissoniano.

En el hígado izquierdo, al separar la placa de Arancio de la cápsula de Laennec encontramos la puerta I, la puerta II separando la placa umbilical de la cápsula de Laennec. Al conectar estas dos puertas, el tronco común de los pedículos de los segmentos 2 y 3 se puede aislar en bloque, o de manera individual. El pedículo del segmento 4 se puede aislar conectando la puerta III con la puerta I o la II. En el hígado derecho, al separar la placa cóstica de la cápsula de Laennec que cubre la fosa cóstica, identificamos las puertas IV y V, al conectar ambas puertas, se puede aislar el pedículo derecho anterior y el pedículo posterior al unir las puertas V y VI. Los pedículos más distales pueden ser aislados de forma extrahepática, pero aumenta el riesgo de penetrar en el parénquima hepático y producir una lesión vascular. Las puertas descritas son las siguientes:

- Puerta I: el extremo inferior de la placa de Arancio.
- Puerta II: la unión entre el ligamento redondo y la placa umbilical.
- Puerta III: el extremo derecho de la raíz del pedículo glissoniano de la porción umbilical.
- Puerta IV: el extremo izquierdo de la extremidad posterior de la placa cóstica o el pedículo glissoniano anterior.

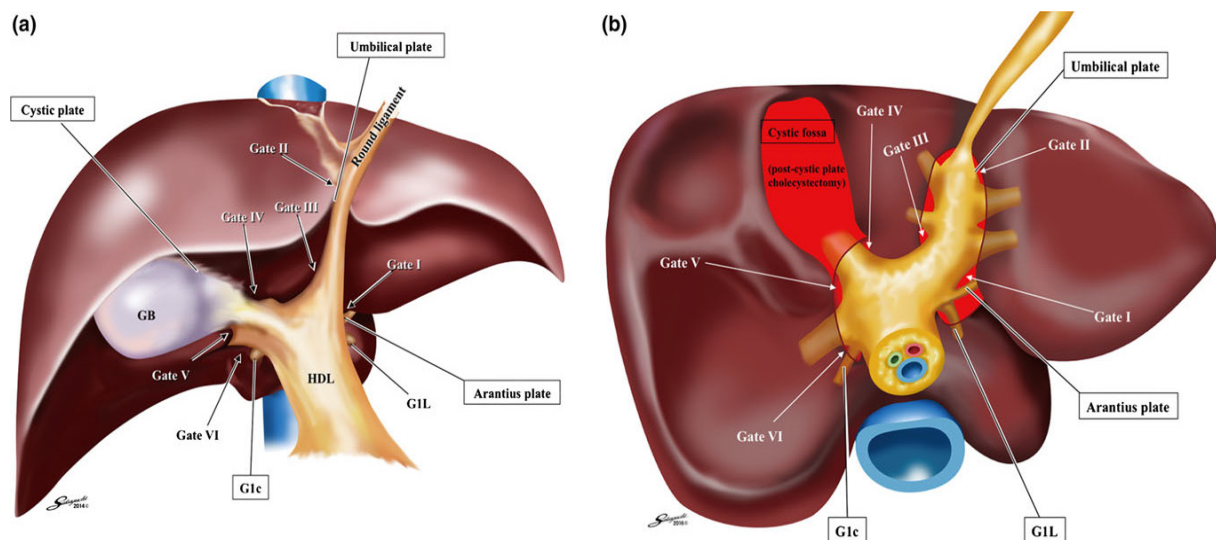


Figura 2¹⁴. Puntos de referencia anatómicos (visión anterior) y las seis "puertas" (visión caudal) para el aislamiento extrahepático del pedículo glissoniano.

- Puerta V: la bifurcación del pedículo glissoniano derecho principal.
- Puerta VI: el espacio entre el pedículo glissoniano posterior y el pedículo del proceso caudado.

1.3. ANATOMÍA FUNCIONAL DEL HÍGADO

El conocimiento anatómico actual del hígado se fundamenta en los estudios de Couinaud de 1957¹⁵, que describió ocho segmentos hepáticos funcionalmente independientes, en base a la división producida por la interposición de las venas suprahepáticas y portales.

Las venas suprahepáticas derecha, media e izquierda constituyen tres ejes verticales que en su trayecto van a delimitar cuatro secciones [Figura 3³]:

- En primer lugar, la vena suprahepática media divide el hígado en derecho e izquierdo.
- La vena suprahepática derecha delimita la sección posterior derecha (o posterolateral) y anterior derecha (o paramedial) del hígado derecho.
- La vena suprahepática izquierda divide las secciones medial izquierda y lateral (o posterior) izquierda del hígado izquierdo.

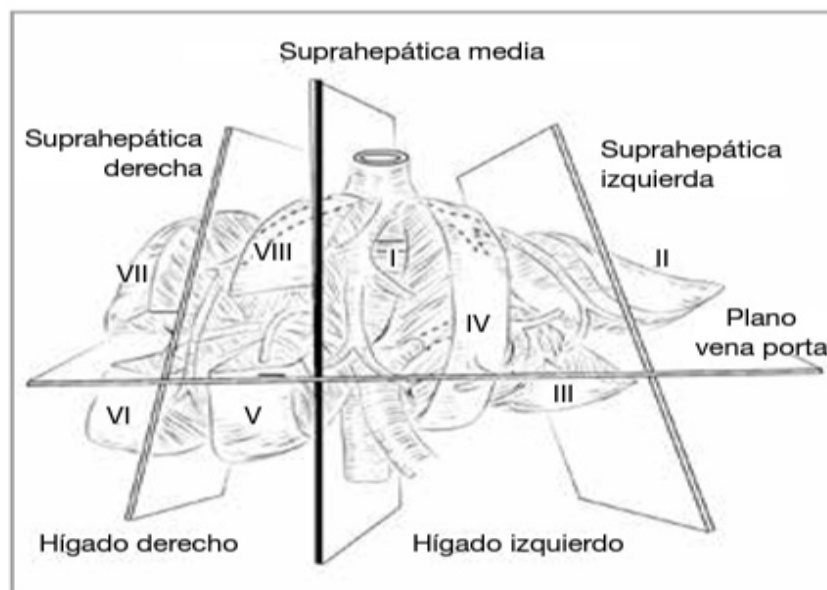


Figura 3³. Planos de división del hígado en cuatro secciones en base al trayecto de las venas suprahepáticas.

Los ejes verticales delimitados por el trayecto de las tres venas suprahepáticas principales, conforman las cisuras portales, unas líneas imaginarias de separación entre estas cuatro secciones. Las cisuras portales se encuentran entre dos territorios porta y contienen las venas suprahepáticas:

- Cisura portal o interseccional derecha por el plano de la vena suprahepática derecha. En aproximadamente la mitad de los pacientes la vena hepática derecha no realiza todo su recorrido por el plano interseccional derecho.
- Cisura sagital, portal principal o media que divide el hígado en derecho e izquierdo y discurre desde la fosa vesicular al borde izquierdo de la vena cava inferior, coincidiendo con el plano de la vena suprahepática media y por tanto la línea de división entre el hígado derecho y el izquierdo.
- Cisura portal o interseccional izquierda por detrás de la fisura umbilical, siguiendo el ligamento redondo y falciforme, pero adquiere un sentido transversal hacia el extremo del lóbulo izquierdo coincidiendo con el recorrido de la vena hepática izquierda.

Estas cisuras portales son las líneas que se deben seguir durante una resección reglada del parénquima hepático^{1,5}. Sin embargo, si se disecciona a través de una cisura portal, se respeta la vascularización portal, arterial y los conductos biliares, pero se puede lesionar una vena suprahepática. Sin embargo, estas líneas de división no coinciden totalmente con las fisuras externas del hígado; para la cisura derecha no existe una referencia en la superficie hepática, y la cisura portal izquierda no es equivalente a la fisura umbilical. Las cisuras suprahepáticas en cambio son aquellas situadas entre dos territorios de venas suprahepáticas y contienen los pedículos glissonianos.

Cada una de estas cuatro secciones recibe un pedículo propio, y se divide a su vez a través de un eje transversal u horizontal marcado por la bifurcación de la vena porta en los pedículos derecho e izquierdo, que dividen el hígado en los segmentos superiores e inferiores. De esta manera, encontramos ocho segmentos hepáticos [*Figura 4³*], cada uno de los cuales tiene su pedículo independiente “de tercer orden” (formado por la tríada portal compuesta de rama portal, rama arterial, y conducto biliar, dichos elementos en conjunto se encuentran rodeados de tejido conectivo, prolongación de la cápsula de Glisson –el denominado pedículo glissoniano–, y una rama venosa para el drenaje), y por tanto son segmentos funcionales^{1,5}.

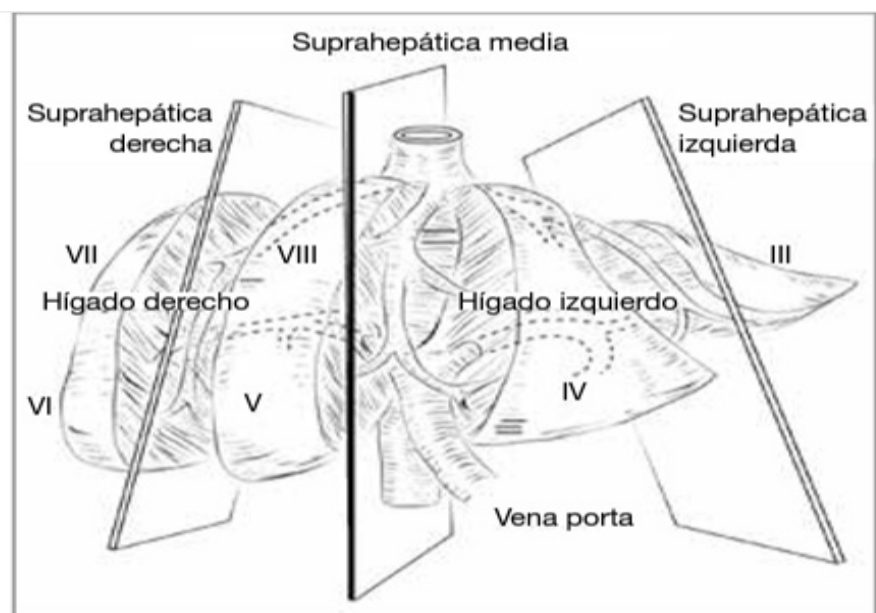


Figura 4³. Planos de división del hígado en ocho segmentos en base al trayecto de las venas suprahepáticas y la bifurcación portal.

Esta comprensión sobre la independencia de los segmentos hepáticos en cuanto a vascularización y drenaje biliar propio, es lo que permite la resección segmentaria del hígado sin comprometer la función del resto del parénquima. La ligadura de un pedículo de manera selectiva previo a la resección va a delimitar el plano del o de los segmentos hepáticos deseados. Sin embargo, se deben tener en cuenta las posibles variaciones anatómicas, especialmente a nivel de la vascularización, y estudiarlas de forma preoperatoria mediante pruebas de imagen dirigidas, como la tomografía computarizada (TC) o la resonancia magnética (RM) con contraste en fase arterial, fase venosa y portal tardía.

1.3.1. Segmentos hepáticos

- El segmento 1, también denominado segmento o lóbulo caudado, o lóbulo de Spiegel:
 - Se localiza posterior al hilio hepático, por detrás de la vena porta y en la zona anterolateral izquierda a la vena cava inferior, con el ligamento de Arancio a su izquierda.
 - Recibe vascularización tanto de las ramas derechas como izquierdas, e incluso del tronco venoso o arterial principal, y realiza su drenaje venoso a través de venas hepáticas independientes (venas de Spiegel)⁴ que drenan de forma directa en la

vena cava retrohepática. Igualmente, carece de conducto biliar propio, ya que presenta varios conductos biliares cortos que drenan en ambos conductos principales derecho e izquierdo o a nivel de su bifurcación.

- Anatómicamente se diferencian tres partes: el lóbulo caudado o de Spiegel a la izquierda de la vena porta; el proceso caudado que es la porción que se encuentra entre la vena cava inferior y la vena porta; y la parte paracaval la más superior, cerca de las venas hepáticas. El ligamento de Arancio constituye la frontera entre el lóbulo de Spiegel y la porción paracaval. En la práctica se diferencian dos zonas (referencia anatómica espacial descrita por Couinaud en 2000), la parte paracaval izquierda o propio segmento 1 (de más fácil abordaje quirúrgico), y la parte paracaval derecha o segmento 9⁵.
- Los segmentos 2 (segmento posterior) y 3 (segmento anterior) van a constituir el segmento lateral izquierdo del hígado o lóbulo izquierdo topográfico, que junto al segmento 4 (segmento medial) van a formar el lóbulo izquierdo funcional o hígado izquierdo, a diferencia del lóbulo izquierdo anatómico clásico que delimita el ligamento falciforme compuesto únicamente por los segmentos 2 y 3.
- Los segmentos 3 y 4 se encuentran a nivel anterior, el segmento 3 localizado a la izquierda de la fisura umbilical y el ligamento redondo, y el segmento 4 a la derecha. El lóbulo cuadrado es una zona de parénquima más voluminosa que se encuentra en la cara inferior del hígado, entre la fosa vesicular a la derecha, el surco umbilical a la izquierda, y anterior al hilio hepático, y forma parte del segmento 4 y por tanto del lóbulo izquierdo³. El segmento 4 se subdivide en 4a y 4b en relación a la división de su pedículo vascular, el 4b correspondería al lóbulo cuadrado y el 4a por encima del mismo.
- Los segmentos 5 (segmento anterior e inferior) y 8 (anterior y superior) y los segmentos 6 (segmento posterior e inferior) y 7 (posterior y superior) van a formar el lóbulo hepático derecho funcional o hígado derecho.

Hay que mencionar que esta terminología en cuanto a la anatomía funcional del hígado es controvertida, ya que existen varios términos (sector, sección, lóbulo...) empleados para entidades diferentes según los autores, especialmente para los autores anglosajones⁴.

1.4. ANATOMÍA QUIRÚRGICA Y TIPOS DE RESECCIONES HEPÁTICAS

Esta clasificación del hígado en segmentos es clave para la comprensión de la anatomía vascular y biliar, lo que permitió la estandarización y planificación de las resecciones quirúrgicas según la localización de la lesión. Siguiendo esta división funcional en base a los estudios de Couinaud, Tung y Bismuth, se disminuye el riesgo de complicaciones de la resección hepática (fundamentalmente sangrado, lesión biliar) tratando de no comprometer el parénquima restante para evitar la insuficiencia hepática postoperatoria.

Basándose en las descripciones de Couinaud, se realizó una categorización de la terminología anatómica y quirúrgica del hígado en el año 2000, en un consenso de expertos por parte del Comité Científico de la Asociación Internacional Hepatobilio-Pancreática, conocida como clasificación de Brisbane⁵:

- Divisiones de primer orden: basada en la división de los dos hemihígados a partir de la cisura portal principal o línea de Cantlie.
- Divisiones de segundo orden: basada en la distribución de las cuatro secciones, por las cisuras portal principal, portal derecha y portal izquierda.
- Divisiones de tercer orden: basadas en la división de los ocho segmentos. En este orden, los planos de división se conocen como planos intersegmentales.

Existen resecciones no regladas, en cuña o atípicas, que no siguen estos planos determinados, y resecciones regladas o típicas. Estas resecciones regladas van a incluir uno o varios de los segmentos estandarizados a través de sus límites anatómicos, y por tanto respetando su vascularización para asegurar la viabilidad del parénquima remanente. Siguiendo la clasificación de Brisbane, se definen^{1, 5} [Tabla 1⁵]:

- Hepatectomía o hemihepatectomía: la sección del parénquima se realiza a través del plano de la vena suprahepática media o cisura sagital, por el lecho vesicular, a la izquierda de la vena cava inferior suprahepática y a la derecha del hilio hepático. La hepatectomía izquierda incluye la extirpación de los segmentos 2, 3 y 4, pudiéndose incluir además el segmento 1. La hepatectomía derecha incluye los segmentos 5, 6, 7 y 8.

INTRODUCCIÓN

<i>Término anatómico</i>	<i>Segmentos de Couinaud</i>	<i>Término quirúrgico</i>	<i>Esquema</i>
<i>División de primer orden</i>			
Hígado derecho o hemihígado derecho	5-8 ($\pm$ 1)	Hepatectomía derecha o hemihepatectomía derecha (indicar $\pm$ segmento 1)	
Hígado izquierdo o hemihígado izquierdo	2-4 ($\pm$ 1)	Hepatectomía izquierda o hemihepatectomía izquierda (indicar $\pm$ segmento 1)	
Límites: el límite de la división de primer orden que separa los dos hemihígados es un plano que va de la fosa vesicular a la vena cava inferior (plano medio del hígado)			
<i>División de segundo orden</i>			
Sección anterior derecha	5,8	Seccionectomía anterior derecha	
Sección posterior derecha	6,7	Seccionectomía posterior derecha	
Sección medial izquierda	4	Seccionectomía medial izquierda o resección del segmento 4 o segmentectomía 4	
Sección lateral izquierda	2,3	Seccionectomía lateral izquierda o bisegmentectomía 2,3	
<i>Otras resecciones hepáticas "seccionales"</i>			
	4-8 ($\pm$ segmento 1)	Triseccionectomía derecha o hepatectomía derecha extendida o hemihepatectomía derecha extendida (indicar $\pm$ segmento 1)	
<i>Otras resecciones hepáticas "seccionales"</i>			
	2,3,4,5,8 ($\pm$ segmento 1)	Triseccionectomía izquierda o hepatectomía izquierda extendida o hemihepatectomía izquierda extendida (indicar $\pm$ segmento 1)	
<i>División de tercer orden</i>			
Segmentos 1-9	Cualquiera de 1 a 9	Segmentectomía (p. ej. segmentectomía 6)	
2 segmentos contiguos	Cualquiera 2 en continuidad	Bisegmentectomía (p. ej. bisegmentectomía 5, 6)	
Para mayor claridad no se muestran los segmentos 1 y 9. También es aceptable referirse a cualquier resección por sus segmentos de tercer orden: la hepatectomía derecha se puede llamar también resección segmento 5-8			
<i>Addendum. División alternativa de segundo orden (división de segundo orden basada en la vena porta)</i>			
Sector anterior derecho o sector paramediano derecho	5,8	Sectorectomía anterior derecha o sectorectomía paramediana derecha	
Sector posterior derecho o sector lateral derecho	6,7	Sectorectomía posterior derecha o sectorectomía lateral derecha	
Sector medial izquierdo o sector paramediano izquierdo	3,4	Sectorectomía medial izquierda o sectorectomía paramediana izquierda o bisectosectomía 3,4	
<i>Addendum. División alternativa de segundo orden (división de segundo orden basada en la vena porta)</i>			
Sector lateral izquierdo o sector posterior izquierdo	3,4	Sectorectomía lateral izquierda o sectorectomía posterior izquierda o segmentectomía 2	
Sector anterior derecho y sección anterior derecha son sinónimos. Sector posterior derecho y sección posterior derecha son sinónimos. Sector medial izquierdo y sección medial izquierda no son sinónimos y no son términos intercambiables. No describen las mismas áreas anatómicas. Sector lateral izquierdo y sección lateral izquierda no son tampoco sinónimos y no son términos intercambiables			

Tabla 1⁵. Terminología de Brisbane 2000. Anatomía y resecciones hepáticas.

- En las hepatectomías ampliadas se añaden a los segmentos de la propia hepatectomía (derecha o izquierda), los segmentos adyacentes de la sección contralateral, y por tanto se debe traspasar y ligar la vena suprahepática media. En la hepatectomía izquierda ampliada se engloban los segmentos 5 y 8 siguiendo el trayecto de la vena

suprahepática derecha. En una hepatectomía derecha ampliada se añade el segmento 4 realizando la resección a través de la vena suprahepática izquierda. Tanto la hepatectomía derecha como la izquierda se pueden ampliar al segmento 1.

- La hepatectomía central comprende los segmentos 4 (más la realización de colecistectomía), 5 y 8, y en ocasiones el segmento 1, realizando la resección a través de los planos de las venas suprahepáticas derecha e izquierda, y ligando la vena suprahepática media.
 - Se denomina hepatectomía mayor a cualquier hepatectomía que incluya la resección de tres o más segmentos, como la hepatectomía izquierda o la hepatectomía derecha. Las trisegmentectomías se equiparan a las hepatectomías mayores.
- Seccionectomías: resección de varios segmentos hepáticos a través de sus límites anatómicos.
- La seccionectomía lateral izquierda, lobectomía izquierda o lobectomía lateral izquierda, o segmentectomía 2-3 incluye dichos segmentos, desde el ligamento redondo hacia el plano de la vena suprahepática izquierda. La seccionectomía o segmentectomía medial izquierda comprende el segmento 4. Una alternativa a esta división de segundo orden sería: el segmento 2 como sector posterior izquierdo, y segmentos 3-4 como sector anterior izquierdo⁴.
 - La seccionectomía anterior derecha formada por los segmentos 5 y 8, se realiza ligando la rama anterior de la porta derecha y entre los planos de las venas suprahepáticas derecha y media. La seccionectomía posterior derecha, sigue el trayecto de la vena suprahepática derecha y al ligar la rama posterior de la vena porta derecha, incluye los segmentos 6 y 7 (en un 25% de los casos el drenaje venoso de esta zona puede ocurrir por una vena accesoria directamente a la vena cava inferior en lugar de a la vena suprahepática derecha)³.
- Segmentectomías únicas:
- Segmentectomía 1: su resección aislada presenta mayor dificultad que la de otros segmentos hepáticos por su localización sobre la vena cava inferior y su vascularización, ya que es importante el control y ligadura de las vénulas retrohepáticas y ramas accesorias que drenan directamente a la vena cava inferior (VCI).

- Para la resección aislada del segmento 2 o del segmento 3, se liga el pedículo correspondiente de dicho segmento manteniendo la vena suprahepática izquierda para el drenaje venoso del segmento restante.
- Segmentectomía 4: en su totalidad, o parcial (subsegmentectomía) del segmento 4a o 4b.
- Segmentectomía 7: dificultad técnica por su posición anatómica posterior y bajo el diafragma derecho. Para abordar su pedículo hay que movilizar el hígado de forma completa elevándolo hacia la izquierda del abdomen.

Segmentectomía 8: también presenta dificultad técnica con riesgo de lesionar las venas suprahepáticas derecha y media, o el pedículo del segmento 5. En el segmento 8 también se realizan resecciones subsegmentarias o parciales de su región anterior, media o posterior, debido al gran tamaño de este segmento.

La clasificación de Brisbane del año 2000 basada en los segmentos de Couinaud estableció esta nomenclatura a día de hoy ampliamente utilizada y aceptada. Sin embargo, las descripciones y tipos de hepatectomía son complejas, se proponen múltiples términos para el mismo tipo de resección, y no se describen sus límites ni se identifican resecciones de menos de un segmento, así como tampoco se definen o se clasifican de forma concisa las segmentectomías, con confusión entre los conceptos segmentectomía, seccionectomía y sectorectomía^{13, 16}.

En 2021, Nagino et al.¹⁶ propusieron una nueva terminología para las resecciones hepáticas, con el fin de simplificarla. Se basa en los segmentos de Couinaud resecados. Se nombran dichos segmentos (si se resecan varios segmentos en bloque, se mencionan en orden ascendente; si se resecan de forma separada, se nombran separados con una barra “/”) tras la letra “H” (hepatectomía). En resecciones no anatómicas se nombra el número del segmento seguido de un apóstrofe ('). Si se realiza la resección de la vía biliar, vena porta, arteria hepática, venas suprahepáticas, o VCI, se añaden las siglas correspondientes. Por ejemplo, la resección de los segmentos 5 y 6 se denominará “H56”, la resección parcial de una lesión entre los segmentos 5 y 6 “H5'6”, y la resección parcial y separada de los segmentos 5 y 6 será “H5'/6”.

El concepto de resección anatómica hepática (anatomic liver resection –ALR–) se define como la resección completa de una parte del parénquima hepático confinado dentro

de un territorio portal responsable. Los avances de la cirugía hepática mínimamente invasiva han permitido resecciones cada vez menos extensas y más precisas, dando lugar a la resección hepática anatómica mínimamente invasiva (MIALR –minimally invasive anatomic liver resection–). En 2021 un consenso de expertos (PAM-HBP Surgery Consensus)¹³ presentó la Terminología Tokyo 2020 para la anatomía y resección hepática, actualizando el sistema de Brisbane con definiciones nuevas y respondiendo a cuestiones anatómicas de las segmentectomías y subsegmentectomías.

Takasaki¹⁷ describió el concepto de la resección “cone unit” [Figura 5¹³], resecciones individualizadas o limitadas de una zona de ramificación portal más terminal, así denominadas debido a que estas áreas irrigadas por las ramas terciarias (o de mayor orden) de la vena porta presentan forma de cono. Por tanto, un segmento puede estar formado por uno o múltiples territorios portales de tercer orden (uno o múltiples “cone unit”). Las “cone unit” son las áreas anatómicas más pequeñas basadas en la ramificación portal. En la realidad, los límites de cada uno de los segmentos varían entre individuos, para lo cual son útiles los modelos 3D y el clampaje selectivo de los pedículos, que demarcará la zona de isquemia y por tanto delimitará los bordes segmentarios.

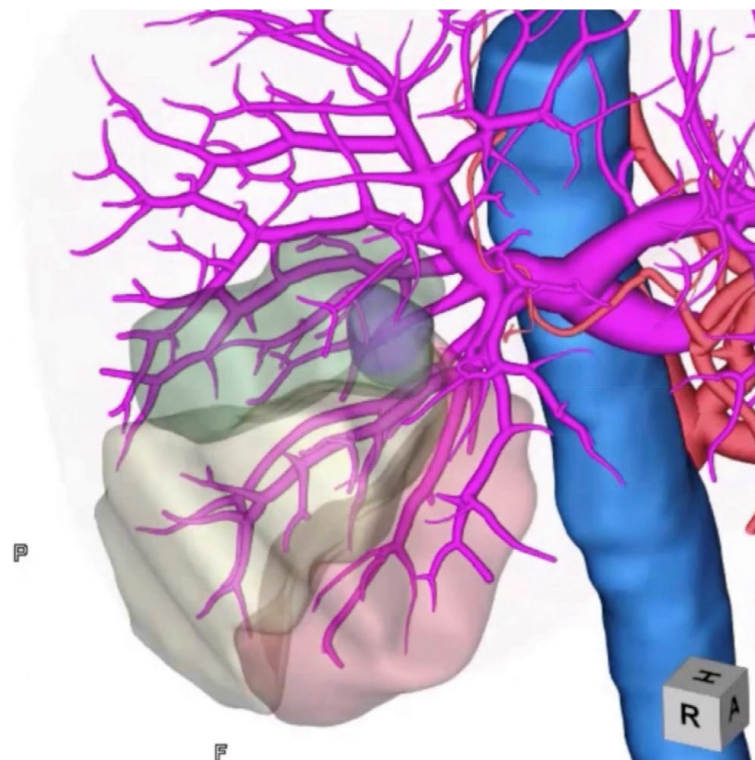


Figura 5¹³. División en tres “cone unit” del segmento 5.

El concepto de subsegmentectomía fue definido inicialmente por Makuuchi¹⁸ para referirse a la resección limitada de los hepatocarcinomas de pequeño tamaño. Actualmente, la subsegmentectomía se considera como la resección de áreas adyacentes irrigadas por ramas venosas portales de mayor a tercer orden (equivalente a las “cone unit”) y por tanto áreas más pequeñas que los segmentos de Couinaud. Esta subsegmentación es particularmente aplicable a los segmentos 8 (normalmente el segmento de mayor volumen del hígado, por lo que se suele dividir en ventral y dorsal, incluso en más subsegmentos según la ramificación portal), el segmento 4 (segmento 4a craneal y segmento 4b caudal; existiría otro subsegmento 4c bajo el ligamento falciforme), y el segmento 1 (constando de tres subsegmentos: lóbulo de Spiegel, proceso caudado, y porción paracaval¹⁹). En el resto de segmentos, también existen ramas venosas portales que delimitarían varias “cone unit” o subsegmentectomías, pero a día de hoy aún no están establecidas. En un futuro será conveniente estudiar y clasificar el número y la dirección de cada uno de estas ramificaciones en aquellos segmentos que presentan una división más o menos constante, ya que la variabilidad anatómica no puede hacer esto posible en todos los segmentos¹³.

Por tanto, para realizar una verdadera y reglada segmentectomía o subsegmentectomía anatómica, se debe realizar un abordaje glissoniano, o realizarse guiada por contraste o fluorescencia. Se puede administrar contraste o verde indocianina (ICG) de forma sistémica tras clampar el pedículo glissoniano (tinción negativa) o realizar una inyección directa en la rama portal (tinción positiva del territorio irrigado por dicha rama). La técnica de la tinción negativa para identificar el área irrigada por un pedículo glissoniano parece ser más sencilla y factible que la inyección directa en la rama portal, especialmente durante una cirugía mínimamente invasiva. Antes de la aparición de estas técnicas, las segmentectomías o subsegmentectomías se realizaban guiadas de una forma “espacial”, utilizando referencias anatómicas y vasculares, la ecografía intraoperatoria o el clampaje selectivo del pedículo para valorar la isquemia del territorio¹³. Aunque estos métodos permitían el marcaje de la zona a reseccionar en la superficie, se volvían imprecisos al profundizar en el parénquima hepático. La tinción con ICG permite la visualización de los planos intersegmentarios/subsegmentarios en profundidad (no visibles de otra manera) para realizar una resección anatómica mínimamente invasiva precisa.

Las resecciones no regladas o menores como la enucleación o la resección en cuña son menos complejas y con menor tasa de complicaciones postoperatorias, y son técnicas que se consideran adecuadas en aquellos casos en los que es necesario una conservación del máximo parénquima posible, o en pacientes que por cuyas características se deba limitar la sección hepática, como en los pacientes con cirrosis que presentan poca reserva funcional². Los objetivos de las resecciones no anatómicas son mantener un buen equilibrio entre la resección radical de la lesión y preservar un adecuado remanente hepático, esto es, conseguir márgenes de resección negativos para prevenir la recurrencia local, manteniendo suficiente volumen de remanente hepático funcional con adecuada vascularización y drenaje. Además, minimizar las áreas isquémicas se considera actualmente un factor determinante para evitar las recurrencias tempranas en el hígado remanente. Al contrario que las cirugías anatómicas, al no seguir los planos de resección este tipo de procedimientos pueden presentar mayor tasa de isquemia, necrosis y fístula biliar.

Sin embargo, las resecciones segmentarias o anatómicas son superiores en términos oncológicos; en metástasis hepáticas de cáncer colorrectal (MHCCR) existe una tasa de márgenes afectados en sólo un 2% de las cirugías frente a un 16-30% de las resecciones no anatómicas, y con mejores tasas de supervivencia. En el caso del hepatocarcinoma (HCC), las resecciones regladas producen un mayor control de la diseminación tumoral por las ramas intersegmentarias. Además, presentan menor tasa de complicaciones especialmente en cuanto al sangrado, que se trata de uno de los principales determinantes de morbilidad y de los resultados de la cirugía hepática, ya que respeta los planos de transección y por tanto la vascularización³.

En general, la elección del tipo de resección dependerá de la extensión de la lesión, la función hepática preoperatoria, y el volumen residual. Al planificar una resección quirúrgica debe tenerse en cuenta la reserva funcional del hígado restante. En pacientes con hígado sano está aceptada la resección de hasta un 75% del parénquima sin que exista repercusión en la funcionalidad; sin embargo, en hígados cirróticos este porcentaje se ve reducido según la afectación y grado de severidad de la cirrosis⁵. En los pacientes cirróticos severos se recomienda realizar resecciones parciales para mantener una adecuada función hepática residual.

2. EVOLUCIÓN DE LA CIRUGÍA HEPÁTICA MÍNIMAMENTE INVASIVA

2.1. CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA

La cirugía es una especialidad dinámica en constante desarrollo, con indicaciones que se ven sustituidas por tratamientos menos agresivos o tratamientos médicos, de acuerdo al avance de otros campos como la radiología intervencionista o la endoscopia y, por otro lado, la aparición de nuevas indicaciones que hasta ahora no se consideraban, en parte por la dificultad técnica o los escasos recursos disponibles. En este aspecto, la cirugía hepática ha progresado de manera considerable ya que, en el pasado, se limitaba prácticamente a cirugías en el contexto de traumatismo hepático y lesiones benignas como el quiste hidatídico, debido a la alta morbilidad y mortalidad de la resección hepática.

La primera resección hepática se realizó en 1716 por Berta, en el contexto de una intervención urgente por un desgarró. La primera resección programada fue realizada por Lagenbuch en 1888 quien practicó la primera lobectomía izquierda parcial, posteriormente en 1889 por Keen se realizó de forma completa, y Wendel en 1910 llevó a cabo la primera lobectomía hepática derecha. En 1952, Lortat-Jacob publicó la primera resección anatómica por cáncer, una hepatectomía derecha con control y ligadura vascular extrahepática³. Los avances y estandarización de los conocimientos anatómicos y funcionales del hígado permitieron el progreso de la cirugía hepática, mejorando sus resultados, ofreciendo la posibilidad de realizar nuevas intervenciones y técnicas que de la misma manera han contribuido a su desarrollo, respaldado por hechos como la evolución del trasplante hepático, el uso de la ecografía intraoperatoria, y las nuevas tecnologías como los modelos 3D y los modelos de realidad virtual para planificar la resección⁵.

La evolución de la cirugía hepática también ha ido asociada a la evolución de las propias patologías, algunas de las cuales han ido disminuyendo o aumentando en prevalencia, asociado al cambio poblacional y del estilo de vida, o las que con el surgimiento de nuevos tratamientos se ha abandonado su abordaje quirúrgico. Otras, como la cirugía de las metástasis hepáticas, que hasta los años 80 se consideraba una contraindicación para el rescate quirúrgico por considerar la enfermedad en estado avanzado⁵, es una de las principales indicaciones en

la actualidad de la cirugía hepática. Esto es debido al desarrollo de las pruebas de imagen, el conocimiento anatómico y las nuevas técnicas quirúrgicas, avances en los instrumentos, el manejo y entendimiento anestésico como parte de la intervención quirúrgica, y una adecuada selección de los pacientes.

El concepto de laparoscopia diagnóstica se introdujo en los años 60. El progreso en las tecnologías para la realización del neumoperitoneo y los dispositivos de visión, condujeron a la primera cirugía laparoscópica en 1987, una colecistectomía. Se observó una disminución del dolor postoperatorio y una recuperación más rápida, junto a mejores resultados estéticos, por lo que este abordaje fue reconocido y desde entonces el campo de la cirugía laparoscópica se ha expandido rápidamente²⁰.

2.1.1. Beneficios de la cirugía laparoscópica

Los beneficios propios de la cirugía laparoscópica incluyen también una menor estancia hospitalaria con mejoría de la calidad de vida e incorporación más rápida a las actividades previas, una recuperación precoz del tránsito intestinal, disminución de las complicaciones respiratorias e infección de herida quirúrgica²¹.

Los pacientes que se someten a una resección quirúrgica hepática se exponen a diferentes agresiones: la disminución de la función hepática en relación a la reducción del volumen tras la resección y el daño inducido por la cirugía en las zonas adyacentes al hígado, la disrupción de circulación colateral, flujo linfático, y al propio parénquima por la compresión. El abordaje mínimamente invasivo supone una menor agresión sistémica y respuesta al estrés quirúrgico.

En el abordaje abierto, se accede al espacio subfrénico que contiene el hígado a través de una incisión subcostal y se emplean separadores que elevan los arcos costales para la exposición y movilización del hígado, realizando un abordaje desde anterior. Una de las ventajas específicas de la laparoscopia hepática, aparte de sus beneficios generales, es el acceso directo al campo quirúrgico y al hígado mediante un abordaje caudal. El enfoque caudal es el principal cambio conceptual en la cirugía hepática laparoscópica. Ofrece una visión aumentada y una mejor exposición alrededor de la glándula suprarrenal derecha y la vena cava, y facilita la iden-

tificación de la cápsula de Laennec y el hilio hepático. Esto permite una disección más metódica disminuyendo la manipulación y posible iatrogenia de las estructuras adyacentes, y una menor compresión del parénquima hepático, lo que reduce el riesgo de fallo hepático y ascitis postoperatoria en pacientes con hepatopatía crónica. Además, permite realizar una transección precisa del parénquima hepático en dirección caudal-cranial al identificar mejor las estructuras intraparenquimatosas. Otra ventaja de la cirugía laparoscópica se pone de manifiesto en caso de que se produzca una recidiva de la lesión o enfermedad hepática, ya que los cambios en la anatomía, la fibrosis y la formación de adherencias propias de la cirugía abierta, aumentan la dificultad de una nueva resección quirúrgica o de la posibilidad de trasplante. El abordaje laparoscópico puede facilitar intervenciones posteriores al minimizar estas complicaciones.

2.1.2. Inconvenientes de la cirugía laparoscópica

En contraposición, una de las principales desventajas de la cirugía laparoscópica es la restricción de los movimientos, que puede dificultar el control del sangrado durante la transección por lo que se debe recurrir, al igual que en la cirugía abierta, a la compresión, materiales hemostáticos, clips, suturas, y dispositivos de energía monopolares o bipolares. El control de la presión del neumoperitoneo con un aumento momentáneo de la presión intraabdominal (la presión producida por el neumoperitoneo ha demostrado disminuir el sangrado al producir una contrapresión de las venas suprahepáticas), de la presión de la vía aérea (a veces mediante una breve pausa en la ventilación artificial) y de la presión venosa central, acompañado de un control del flujo hepático, son maniobras que pueden emplearse de forma temporal durante la transección hepática para ayudar al control del sangrado en el parénquima durante la cirugía hepática laparoscópica, y facilitar la visualización de los puntos de sangrado. Se recomienda mantener una presión venosa central baja (< 5 mmHg), al igual que en la cirugía abierta. Colocar al paciente en posición de anti-Trendelenburg también ayuda a disminuir la presión venosa y mejorar la exposición hepática al desplazar el resto de órganos del hilio hepático por gravedad. En caso de fallo de estas medidas, se puede recurrir al clampaje del hilio antes de la conversión.

Otro inconveniente de la laparoscopia es que la falta de una adecuada visión tridimensional (a pesar de los laparoscopios 3D), una visión global reducida a un campo quirúrgico más

limitado, junto a la falta de sensación táctil, pueden producir una desorientación del cirujano en cuanto a la localización e identificación de las lesiones y estructuras intrahepáticas. La simulación preoperatoria, la ecografía y las técnicas de visualización intraoperatorias como el verde de indocianina han ayudado a superar estos inconvenientes²⁰.

Otra preocupación en los comienzos de la cirugía laparoscópica era el embolismo gaseoso, para lo que se planteó la importancia de mantener un neumoperitoneo a bajas presiones, así como mantener una adecuada presión venosa central (una presión venosa baja podría favorecer esta entrada de aire en el torrente venoso hepático durante la cirugía laparoscópica). Posteriormente se ha demostrado que durante las resecciones hepáticas laparoscópicas sí existe paso de CO₂ a la circulación venosa, pero sin repercusión clínica para el paciente. Sin embargo, sí que actualmente se desaconseja el uso de láser de argón debido al riesgo de embolia gaseosa.

Además, en sus inicios se planteó que el abordaje laparoscópico podría producir un mayor riesgo de diseminación tumoral, así como de recurrencia local al no poder obtener márgenes de resección adecuados, e implantes a nivel de las inserciones de los trócares²², lo que posteriormente se ha rebatido.

2.1.3. Evolución de la cirugía hepática laparoscópica

A partir del año 1980, la ecografía intraoperatoria^{3, 23} fue uno de los grandes avances de la cirugía hepatobiliar. Se trata de una herramienta diagnóstica con elevada sensibilidad para lesiones de menor tamaño o lesiones que han respondido al tratamiento oncológico, lesiones no visibles o poco valorables por otras pruebas de imagen, para valorar el tamaño, número de las mismas, características de malignidad, valoración de cirrosis, imprescindible para la valoración de la anatomía hepática y sus relaciones vasculares y con el árbol biliar, márgenes de resección, e incluso como herramienta terapéutica para la realización de tratamientos locales. La ecografía es útil para guiar el plano de resección y evitar lesiones accidentales vasculares o del árbol biliar. En un órgano de alta complejidad y variabilidad anatómica como el hígado, con escasos puntos de referencia en su superficie, lo convierte en un recurso de gran utilidad, con indicaciones prácticamente ilimitadas y un uso muy extendido actualmente gracias a su

fácil disponibilidad. Además, en los últimos años se añaden las ventajas del uso del sistema Doppler.

En los años 90 comenzaron las primeras cirugías hepáticas laparoscópicas por Reich, Gagner, Azagra y Huscher^{3, 21}. Inicialmente la vía laparoscópica se empleaba para la realización de biopsias hepáticas. En 1991 se describió la resección laparoscópica de una lesión benigna²⁴ y en 1992 la primera resección hepática atípica por Gagner. Azagra et al.²⁵ realizaron la primera resección hepática anatómica en 1996, una seccionectomía izquierda lateral. La cirugía hepática laparoscópica comenzó con la resección parcial de los segmentos anterolaterales (2, 3, 4b, 5, y 6), a los cuales era más fácil acceder por laparoscopia.

Sin embargo a principio del siglo XXI, la cirugía hepática totalmente laparoscópica aún no estaba establecida; a pesar de resultados similares a la cirugía abierta, las tasas de morbilidad y mortalidad aumentaban asociado a la complejidad técnica. Esta complejidad y las complicaciones derivadas de ello durante la cirugía laparoscópica se debían principalmente a la dificultad para el control del sangrado, especialmente el control vascular a nivel de la vena cava inferior y las venas suprahepáticas, sumado a la incapacidad de poder realizar compresión manual.

Además, el desarrollo de la cirugía hepática laparoscópica se ha visto enlentecido por una mayor curva de aprendizaje que en otros campos. Según Vigano et al.²⁶ se alcanzaba dicha curva después de 60 casos de resección hepática por vía laparoscópica. Además, se añadía una falta de instrumentación adecuada y una mayor complejidad técnica especialmente para localizar las lesiones intraparenquimatosas. Se perdían gestos básicos de la cirugía abierta como la palpación y movilización manual del hígado y el control vascular. Otro límite para la estandarización de la cirugía laparoscópica durante sus inicios fue el teórico aumento de los costes, lo que posteriormente se ha evaluado observando costes similares o incluso menores a la cirugía abierta debido principalmente a la disminución del tiempo de hospitalización.

La cirugía hepática mayor laparoscópica, definida como la resección de tres o más segmentos contiguos, ha presentado un desarrollo más lento, y es llevada a cabo principalmente por cirujanos hepatobiliares experimentados en centros avanzados con experiencia laparoscópica. La primera serie de hepatectomía mayor laparoscópica se publicó en 1998, e incluía

11 hepatectomías izquierdas. Hasta 10 años después no se publicaron series con más de 100 casos, pero incluían resecciones híbridas o asistidas. En una publicación de 2013 sobre los resultados de diez centros europeos durante un periodo de 15 años, se realizaron 2245 hepatectomías laparoscópicas, de las cuales sólo un 22% fueron hepatectomías mayores²⁷.

En este sentido, en la Primera Conferencia Internacional de Consenso sobre Cirugía Hepática Laparoscópica celebrada en 2008²⁸ se estableció como recomendación que este procedimiento se debía llevar a cabo sólo por cirujanos expertos tanto en cirugía hepática abierta como laparoscópica.

Progresivamente y con el desarrollo de la técnica laparoscópica se han ido evaluando y publicando sus resultados. En un estudio prospectivo de 2015²⁹ se analizaron los factores de riesgo para la aparición de complicaciones postoperatorias tras cirugía hepática mayor laparoscópica. Se recogieron 183 pacientes intervenidos de forma totalmente laparoscópica entre 1998 y 2014; el otro grupo constaba de 28 pacientes con cirugía hepática mayor abierta. En la mayoría de ellos (90,7%) la indicación quirúrgica fue por malignidad. La cirugía más frecuente fue la hepatectomía derecha en el 73,8%. Se realizó conversión a cirugía abierta en 21 pacientes (11,5%), debido a sangrado intraoperatorio en 12 de ellos. Se consiguió una resección R0 en 177 pacientes (96,7%) y la mortalidad fue del 2,7%. Un 54,6% de los pacientes tuvo complicaciones postoperatorias, siendo las complicaciones Clavien-Dindo $\geq$ III un 23,5%, la mayoría fuga biliar, y en menor porcentaje abscesos intraabdominales, ascitis, y sangrado. No hubo diferencias significativas en los resultados postoperatorios entre los pacientes intervenidos con laparoscopia de los pacientes intervenidos por abordaje abierto, pero se observó que la fuga biliar se diagnosticó más tarde en el grupo del abordaje laparoscópico. La estancia hospitalaria fue menor de forma significativa en el grupo de laparoscopia. La hipertensión, el uso de radiofrecuencia concomitante y la resección combinada de otros órganos, se asociaron con la morbilidad postoperatoria en el análisis univariable. En el análisis multivariable sólo el uso de radiofrecuencia intraoperatoria fue un factor de riesgo independiente de incremento de la morbilidad postoperatoria. Igualmente, la transfusión intraoperatoria y la resección bilobar fueron asociados de forma independiente con un incremento de la incidencia de complicaciones mayores.

En general, las hepatectomías mayores laparoscópicas tienen menor pérdida sanguínea, morbilidad y tiempo de estancia hospitalaria con tiempos quirúrgicos, tasas de transfusión, mortalidad y márgenes de resección similares comparado con la cirugía abierta. Hoy en día las resecciones menores presentan resultados similares a las hepatectomías mayores y puede servir como experiencia para la curva de aprendizaje.

Con la evolución de la técnica laparoscópica y en relación con sus limitaciones, surgen varias modificaciones de la misma:

- La laparoscopia pura o total se refiere a la cirugía hepática realizada totalmente a través de los trócares o puertos laparoscópicos, con la extracción de la pieza por una incisión ampliada de los mismos o una pequeña incisión remota, lo más frecuente suprapúbica.
- La laparoscopia asistida, con ayuda manual o “hand-assisted laparoscopic surgery” (HALS), es aquella en la que se emplea un trocar especial para la introducción de la mano del cirujano en el campo quirúrgico, permitiendo una exploración manual y la movilización del hígado, el control de ambos lóbulos, del hilio hepático y de las venas suprahepáticas, valorar márgenes de resección, realizar adhesiolisis de forma segura, así como facilitar la ecografía intraoperatoria y el control del sangrado y compresión de los tejidos. Esta técnica surge derivada del abordaje de los segmentos desfavorables a nivel técnico, como son los segmentos superiores y posteroinferiores del lóbulo derecho (se facilita movilizar de forma completa el lóbulo derecho, transformando los segmentos posteriores en anteriores)²², y para tumores de gran tamaño o lesiones próximas a los grandes vasos.
- Técnica híbrida: consiste en iniciar la intervención por vía laparoscópica para la movilización del hígado y posteriormente completar la cirugía a través de una mini-laparotomía para la transección hepática.

La laparoscopia pura es la técnica más empleada actualmente a nivel mundial, pero en algunos centros se emplea HALS o la técnica híbrida, especialmente en casos de lesiones de gran tamaño, posteriores, hepatectomía del donante o para manejar dificultades intraoperatorias disminuyendo la frecuencia de conversión a cirugía totalmente abierta. La técnica HALS

o el abordaje híbrido pueden constituir un paso intermedio en la curva de aprendizaje de la cirugía abierta a laparoscópica.

La conversión a cirugía abierta puede ocurrir en caso de dificultad técnica por las características del tumor o por la aparición de una complicación, como una hemorragia significativa de difícil control. Los factores de riesgo que se plantean para la conversión a cirugía abierta son la edad superior a 75 años, un IMC elevado (> 28), el tamaño del tumor (> 10 centímetros), la resección extensa, resección en los segmentos posterosuperiores, la necesidad de reconstrucción biliar y la cirrosis; esto supone un aumento de la morbilidad postoperatoria, pero con resultados similares en comparación con la cirugía abierta programada, por lo que estos factores no constituyen sin embargo una contraindicación para el abordaje laparoscópico³⁰.

Inicialmente el abordaje laparoscópico puro se estableció en la Primera Conferencia Internacional de Consenso sobre Cirugía Hepática Laparoscópica en 2008 de Louisville²⁸, para la cirugía de lesiones quísticas benignas, lesiones únicas de pequeño tamaño (< 5 cm) de los segmentos anteriores y laterales o del lóbulo izquierdo (más factible a nivel laparoscópico debido a su menor grosor, posibilidad de resección sin disección del hilio, y la accesibilidad de la vena hepática izquierda y los pedículos de los segmentos 2 y 3), lesiones que se encontraran a distancia del hilio hepático y la vena cava, lo que suponía menos de un 20% de las cirugías hepáticas²¹, por lo que la laparotomía seguía siendo el abordaje inicial en la mayoría de centros para los tumores sólidos hepáticos, especialmente las lesiones centrales y en los segmentos desfavorables.

Sin embargo, a partir de entonces el número de resecciones hepáticas laparoscópicas reportadas aumentó por todo el mundo, determinado este crecimiento por la realización de una mayor proporción de nuevos procedimientos quirúrgicos (resecciones mayores, resecciones anatómicas, cirugía del HCC) unido a la innovación quirúrgica, especialmente en centros altamente especializados, aunque las resecciones menores siguieron constituyendo la gran mayoría de procedimientos laparoscópicos en la práctica clínica. Asia del Este, Norteamérica y Europa fueron los precursores de esta difusión de la cirugía hepática laparoscópica.

En 2014 se celebró la Segunda Conferencia Internacional de Consenso sobre Cirugía Hepática Laparoscópica³¹ con el fin de determinar el papel de la cirugía laparoscópica hepáti-

ca en ese momento, centrándose en la comparación con las resecciones abiertas que seguían siendo entonces la práctica estándar, y así poder desarrollar recomendaciones y guías de consenso a través de una revisión de la literatura disponible y presentaciones de expertos de 18 países. En esta conferencia de 2014 la tasa de cirugía laparoscópica era de un 5-30% del total de intervenciones, en algunos centros especializados hasta un 50-80%. Hasta ese momento, la mayoría de resecciones hepáticas laparoscópicas publicadas en la literatura continuaban siendo resecciones menores, lesiones periféricas, resecciones no anatómicas, seccionectomías laterales izquierdas o resecciones de los segmentos favorables (2, 3, 4b, 5 y 6). Por tanto, las recomendaciones de este consenso se basaban en esos tipos de resecciones y no en otras más dificultosas como la de los segmentos posterosuperiores. De hecho, ya en el primer consenso de 2008, se planteaba que las resecciones laparoscópicas de los segmentos posterosuperiores debían considerarse resecciones mayores.

En esta segunda conferencia, hablando de las resecciones menores, se concluyó que: 1) la laparoscopia tenía mejores resultados postoperatorios en el control de la ascitis de pacientes cirróticos; 2) la laparoscopia no era inferior a la cirugía abierta en cuanto a la mortalidad perioperatoria, negatividad de los márgenes, y supervivencia total; y 3) que el tiempo de hospitalización era inferior en comparación con la cirugía abierta.

En cuanto a las resecciones mayores, la laparoscopia no resultaba inferior para la mortalidad a los 30 y 90 días, complicaciones postoperatorias (las complicaciones relacionadas con el hígado como el fallo hepático se relacionan más con el volumen de hígado resecado que con el tipo de abordaje quirúrgico), negatividad de los márgenes, y supervivencia total; y de nuevo la laparoscopia fue superior en cuanto a la estancia hospitalaria. También mejoran los scores de dolor y sin diferencias en cuanto a la calidad de vida. Para cualquier tipo de resección hepática, en las pérdidas hemáticas y necesidad de transfusión sanguínea los resultados de la laparoscopia fueron superiores, teniendo en cuenta que esta variable es de especial importancia en patología maligna ya que evitar la transfusión perioperatoria se ha asociado con un retraso en la recurrencia tumoral postoperatoria.

El consenso europeo sobre Cirugía Hepática Laparoscópica se celebró en Southampton en 2017³⁰ con el objetivo de presentar y validar unas guías de práctica clínica debido al con-

tinuo y exponencial desarrollo de la cirugía hepática laparoscópica. Estas guías se basaron en la evidencia publicada y en la opinión de expertos, y se centraron en sus potenciales ventajas, con la intención de reducir la variabilidad en su práctica para un desarrollo y futuro seguros. Se realizaron recomendaciones sobre cinco puntos clave: indicaciones, selección de pacientes, procedimientos, técnicas e implementación; posteriormente se subdividieron estos temas. Se destacó la importancia de realizar cirugía hepática laparoscópica con experiencia y entrenamiento y en un centro especializado y con recursos para su práctica. En estas guías la tasa de cirugía hepática laparoscópica se calculó entre un 30-60%.

2.1.4. Indicaciones y resultados de la cirugía hepática laparoscópica

Las indicaciones de cirugía hepática laparoscópica son las mismas que para la cirugía abierta, siguiendo criterios oncológicos (en general, ausencia de enfermedad tumoral no resecable fuera del hígado), anatómicos y técnicos (localización de la lesión o lesiones que permitan una resección conservando un volumen de parénquima adecuado para asegurar una buena reserva funcional)²¹.

En términos generales es conocido que el abordaje laparoscópico presenta menos complicaciones, pérdidas sanguíneas y estancia hospitalaria con resultados oncológicos comparables en pacientes seleccionados, por lo que todos los centros podrían implementar la cirugía hepática laparoscópica de forma gradual garantizando la seguridad del paciente. Es importante para la implementación y desarrollo de la cirugía laparoscópica una formación adecuada de los cirujanos mediante fellowships, cursos y programas en centros especializados con alto volumen que realicen todo tipo de resecciones (30). En cuanto a los resultados, la mortalidad de la cirugía hepática laparoscópica varía entre el 0 y el 5%. La morbilidad oscila entre el 15-45%. La estancia media de ingreso es de 7 días^{26, 27, 29}.

Estos resultados están determinados evidentemente por el tipo de resección hepática realizada. La dificultad y resultados de la cirugía hepática laparoscópica están influenciados por varios factores, como el tamaño y localización del tumor, número de lesiones, la extensión de la resección hepática, la existencia de una cirugía hepática previa y la proximidad a las estructuras vasculares. No existe consenso aún sobre la importancia de cada uno de estos

factores, pero existen scores para predecir esta dificultad a partir de las variables preoperatorias con el fin de realizar una adecuada selección de los pacientes. Lesiones de gran tamaño, incluso mayores de 10 centímetros, se pueden abordar también de forma laparoscópica sin aumentar la morbilidad, aunque con mayor tiempo operatorio y pérdida sanguínea comparado con tumores de menor tamaño; así como lesiones cercanas a estructuras vasculares. En cuanto a los factores relacionados con el paciente, para pacientes de mayor edad la laparoscopia presenta las mismas ventajas de menor morbilidad con resultados oncológicos similares a la cirugía abierta. El índice de masa corporal también es considerado un factor predictor, pero hay menos estudios que evalúen la laparoscopia en pacientes obesos, y en términos generales se considera un abordaje adecuado.

2.1.4.1. Tumores hepáticos benignos

Para las lesiones benignas, igualmente son indicación de abordaje laparoscópico las lesiones sintomáticas, con riesgo de sangrado, o si existen dudas diagnósticas. En el abordaje laparoscópico se recomienda al igual que en cirugía abierta, la resección anatómica y las estrategias de preservación de parénquima. Las estrategias de preservación del parénquima surgieron a principio de la década de los 2000, y tienen como objetivo mantener el máximo volumen posible de parénquima sano posible para ayudar posibles resecciones hepáticas posteriores en caso de recurrencia de la enfermedad y disminuir el riesgo de fallo hepático posthepatectomía, con resultados oncológicos válidos.

Para la patología benigna, el número de resecciones laparoscópicas cada vez es mayor, con una menor pérdida sanguínea intraoperatoria menor, menor frecuencia de complicaciones, requerimiento de analgesia postoperatoria, tiempo hasta la ingesta oral y estancia hospitalaria. Se debe destacar que suele tratarse de pacientes de menor edad.

2.1.4.2. Metástasis hepáticas de cáncer colorrectal

El hígado es la localización más frecuente de metástasis de cáncer colorrectal. Existen múltiples tratamientos oncológicos pero la resección quirúrgica es la única opción curativa, con unas tasas de supervivencia a los 5 años de entre el 40-57%. Los avances en los tratamien-

tos sistémicos neoadyuvantes han permitido el aumento del número de pacientes candidatos a esta cirugía, y el desarrollo de la técnica quirúrgica ha disminuido la mortalidad a los 30 días a menos de un 2% actualmente³².

La cirugía abierta se consideraba el tratamiento “gold standard”, ya que en combinación con la quimioterapia se conseguían unas tasas de supervivencia a los 5 años del 30-60%. Por ello, la implementación de la cirugía laparoscópica de las MHCCR ha sido más lenta. Los primeros estudios eran retrospectivos, metaanálisis, y sugirieron mejores resultados a corto plazo, en cuanto a menos complicaciones, menor estancia hospitalaria y menores costes, pero con resultados similares a largo plazo en comparación con la cirugía abierta³³.

Este metaanálisis de 2014³⁴ ya encuentra una reducción de las pérdidas hemáticas y necesidad de transfusión con tiempos quirúrgicos similares en el grupo de cirugía laparoscópica. La supervivencia total y libre de enfermedad fue comparable en ambos grupos, con una incidencia de resecciones R1 menor en el grupo de laparoscopia. Una mayor amplitud de los márgenes en las resecciones R0 no se correlaciona significativamente con una mejor supervivencia global, y, por tanto, las guías de 2017 determinan que las resecciones que preservan el parénquima deben seguir siendo la base del tratamiento de las metástasis hepáticas. Estas guías ya concluyen que, con la experiencia adecuada, el abordaje laparoscópico es una alternativa válida para el tratamiento de las MHCCR.

En cuanto a la resección simultánea del cáncer primario de colon y las metástasis hepáticas sincrónicas, el abordaje laparoscópico se asocia a una estancia hospitalaria menor que el abordaje abierto sin diferencia en la supervivencia total de estos pacientes; sin embargo, se debe tener en cuenta que una resección hepática mayor combinada con una resección colónica es un procedimiento complejo y largo con aumento de los riesgos. Las resecciones laparoscópicas simultáneas del cáncer primario fuera del recto con una resección hepática menor o limitada son una buena opción de tratamiento. Esta decisión debe basarse en consideraciones técnicas y oncológicas tras un enfoque multidisciplinar. Se han demostrado iguales resultados para las metástasis de tumores neuroendocrinos y de otros tumores de origen no colorrectal con adecuada seguridad y resultados oncológicos.

El estudio OSLO-COMET publicado en 2018³² es el primer ensayo clínico aleatorizado que compara la cirugía abierta versus laparoscópica de las MHCCR. Se aleatorizaron un total de 280 pacientes de un único centro. En todos se realizó una resección con preservación del parénquima, definida en este estudio como la resección de menos de 3 segmentos hepáticos consecutivos; se incluyeron pacientes que precisaban múltiples resecciones, pacientes con metástasis recurrentes con resección hepática previa (abierta o laparoscópica), y pacientes con metástasis pulmonares o adrenales resecables. El objetivo primario fue analizar la tasa de complicación postoperatoria a los 30 días: menor en el grupo de laparoscopia con un 19%, y en el grupo de cirugía abierta un 31%, de forma estadísticamente significativa, similar a lo que se había publicado en estudios retrospectivos previos. La estancia hospitalaria fue menor en el grupo de laparoscopia (53 versus 96 horas) también de forma significativa. No hubo diferencias en la pérdida sanguínea o tasa de transfusión, tiempo quirúrgico, y tasa de márgenes de resección R0, así como en la mortalidad a los 90 días (1 paciente en el grupo de cirugía abierta y ninguno en el grupo de laparoscopia). Los scores de dolor postoperatorio fueron similares en ambos grupos, pero los pacientes del grupo de cirugía abierta necesitaron más derivados de morfina. El coste del procedimiento fue significativamente mayor para las resecciones laparoscópicas, sin embargo, debido a la menor estancia hospitalaria, los costes totales fueron equivalentes entre ambos grupos. Por tanto, se concluye que la cirugía laparoscópica con estrategia de preservación del parénquima para las MHCCR es coste-efectiva. Una limitación de este estudio es la posible afectación en la validación externa al tratarse de pacientes de un único centro, aunque esto permitió una mayor estandarización del diseño en cuanto al proceso diagnóstico, la selección de los pacientes, la técnica quirúrgica y los cuidados postoperatorios.

Posteriormente, otro ensayo clínico aleatorizado de 2019 desarrollado por nuestro grupo³⁵ tuvo como finalidad comparar los resultados clínicos, quirúrgicos y oncológicos entre la resección hepática mínimamente invasiva y la resección hepática abierta. El objetivo primario fue evaluar la morbilidad postoperatoria a largo plazo (en los primeros 90 días): se obtuvo un porcentaje de complicaciones significativamente menor en el grupo de cirugía laparoscópica (11,5% versus 23,7%), pero con complicaciones severas (Clavien-Dindo $\geq$ IIIb) similares, así como la mortalidad (1 paciente en cada grupo). En cuanto a los resultados oncológicos a largo plazo, la recurrencia de la enfermedad, la supervivencia total y la supervivencia libre de enfer-

medad al primer, 3, 5 y 7 años, los porcentajes fueron comparables entre ambos grupos. En la cirugía laparoscópica se empleó más la maniobra de Pringle y se obtuvo una menor estancia hospitalaria. En el resto de variables (resecciones R0, tiempo quirúrgico, pérdida sanguínea, transfusión y mortalidad) no hubo diferencias.

Hay que destacar que, en el caso de la cirugía hepática por metástasis de origen colorectal, el abordaje laparoscópico se vuelve una opción más considerable debido a la posibilidad de simplificar posibles reintervenciones posteriores, y por tanto mejorar los resultados globales en cuanto a sangrado, tasa de transfusión y complicaciones, y estancia hospitalaria. En este sentido, algunos estudios han sugerido que la cirugía laparoscópica permite un inicio más temprano de la quimioterapia adyuvante, esto podría deberse a la menor agresividad quirúrgica de la laparoscopia, menor morbilidad e inmunosupresión que la producida en cirugía abierta³⁵.

2.1.4.3. Hepatocarcinoma

En cuanto al hepatocarcinoma, sus opciones de tratamiento incluyen la resección quirúrgica, el trasplante, o técnicas más recientes y menos agresivas como la quimioembolización transarterial o de ablación local²⁰. La resección quirúrgica y el trasplante producen los mejores resultados en cuanto a curación; en tumores pequeños superficiales la supervivencia con TACE es menor que con la cirugía, y existe riesgo de rotura tumoral y siembra con la radiofrecuencia. La mayoría de pacientes con HCC presentan enfermedad hepática crónica y un mayor riesgo de complicaciones, mortalidad tras el tratamiento oncológico, la anestesia o la cirugía (fundamentalmente dependiendo de la clasificación de Child-Pugh). Además, tienen una mayor posibilidad de aparición de lesiones recurrentes. Por lo tanto, la elección de tratamiento debe ser individualizada para cada paciente dependiendo de las características del tumor y un estudio adecuado de la función hepática.

La supervivencia a 5 años actual del HCC tras la resección quirúrgica es entre un 38-61% dependiendo del estadio de la enfermedad. A pesar de los avances, menos del 30% de los pacientes con HCC son candidatos a la resección quirúrgica. Las ventajas que ofrece la laparoscopia pueden ayudar a mejorar estos datos y expandir la indicación de cirugía en estos pacientes.

Múltiples estudios y metaanálisis que comparan la laparoscopia con la cirugía abierta del HCC han evidenciado los mejores resultados de la laparoscopia con reducción de la pérdida sanguínea, tasa de transfusión³⁶, ascitis postoperatoria, fallo hepático (incluso en pacientes cirróticos) y estancia hospitalaria con similar tiempo quirúrgico, márgenes libres y tasas de recurrencia, incluso para resecciones mayores. En pacientes cirróticos con hipertensión portal significativa, ascitis, y Child-Pugh B existe evidencia más limitada y se recomienda mayor precaución.

2.1.4.4. Colangiocarcinoma intrahepático

El colangiocarcinoma es el segundo tumor primario más frecuente del hígado, con una incidencia y mortalidad en ascenso, recurrencia elevada, baja tasa de pacientes resecables al diagnóstico y pronóstico limitado. Se asocia a metástasis linfáticas, lo cual es un factor pronóstico y obliga a realizar una linfadenectomía adecuada para su estadiaje. El uso de la fluorescencia en estos tumores puede facilitar una adecuada disección ganglionar. Inicialmente se planteaba la laparoscopia exploradora para pacientes de alto riesgo de enfermedad irresecable, de cara a evitar la laparotomía. En la actualidad, un reciente metaanálisis liderado por el grupo de Navarra y varios estudios retrospectivos han demostrado que el abordaje laparoscópico es seguro y factible con mejores resultados a corto plazo tras la cirugía y similares resultados oncológicos.

En este metaanálisis de 2020³⁷ se compararon las diferencias entre la resección hepática laparoscópica y abierta con intención curativa para el CC. Tras analizar los resultados, la resección por laparoscopia se asoció a menor tasa de transfusión, tasas de resección R0 mayores, menor estancia hospitalaria, menor morbilidad total y menor mortalidad por progresión o recurrencia de la enfermedad, aunque hay que mencionar que los casos de laparoscopia eran tumores de menor tamaño, con menor número de hepatectomías mayores y menor número de ganglios linfáticos extirpados, y con una supervivencia a los 5 años significativamente menor. No se encontraron diferencias en cuanto al tiempo quirúrgico, las pérdidas sanguíneas estimadas, ni recurrencia del tumor. La tasa de conversión a cirugía abierta fue del 12,8%. Esto fue debido principalmente debido al sangrado, las adherencias, riesgo de una inadecuada resección oncológica, exposición insuficiente de la lesión o invasión tumoral a estructuras adyacentes.

Con dichos resultados, no se pudo concluir que el abordaje laparoscópico para el colangiocarcinoma intrahepático como válido, especialmente para lesiones grandes.

En esta revisión sistemática reciente³⁸ se analizaron los datos de seis estudios para comparar la hepatectomía laparoscópica frente a la hepatectomía abierta en pacientes con colangiocarcinoma intrahepático, en cuanto a los resultados a corto y largo plazo quirúrgicos, oncológicos y de supervivencia. En el grupo de cirugía laparoscópica tanto la morbilidad mayor (complicaciones Clavien-Dindo $\geq$ III) como la estancia hospitalaria fue significativamente menor, y no hubo diferencias en la mortalidad a los 90 días entre ambos grupos, tampoco en la mortalidad a largo plazo (al primer año, 3 y 5 años) ni en la supervivencia libre de enfermedad, así como en las tasas de resección R0 o diferencias en cuanto a la linfadenectomía. Por tanto, se concluye aquí que la laparoscopia del CC tiene mejores resultados a nivel quirúrgico en cuanto a menores complicaciones graves y estancia hospitalaria, con resultados oncológicos similares. Esta diferencia en cuanto a la morbilidad podría deberse a la visión laparoscópica de alta definición del campo quirúrgico, que podría ayudar a definir el trayecto de las estructuras vasculares y biliares, y por tanto con menor lesión de las mismas, fuga biliar y sangrado; la ventaja de la laparoscopia en cuanto a menor manipulación del hígado que resulta en menor incidencia de ascitis refractaria y fallo hepático; y la menor estancia hospitalaria debido al menor dolor postoperatorio, deambulación temprana, y menor incidencia de infecciones.

2.1.4.5. Colangiocarcinoma perihiliar

La literatura reciente ha demostrado los beneficios de la cirugía laparoscópica en el colangiocarcinoma intrahepático, no así en el colangiocarcinoma perihiliar. El colangiocarcinoma perihiliar o tumor de Klatskin es una patología de mal pronóstico cuyo tratamiento más importante y potencialmente curativo es la cirugía radical, la cual, al igual que en el colangiocarcinoma intrahepático, conlleva una dificultad y requiere una gran habilidad técnica al involucrar resección biliar y vascular, hepatectomías mayores, y reconstrucciones complejas.

Por estos motivos, la evidencia publicada en cuanto al abordaje laparoscópico es limitada. Este análisis retrospectivo de 2023³⁹ compara los resultados a corto plazo de la cirugía laparoscópica total de este tumor frente a la cirugía abierta, con modelos univariantes

y multivariantes para identificar factores pronósticos. En los pacientes sometidos a cirugía laparoscópica, se observó menor tasa de hepaticoyeyunostomía, necesidad de plastia biliar, resección vascular, estancia hospitalaria, y porcentaje de complicaciones severas (Clavien-Dindo $\geq$ III) de forma significativa; sin embargo, tras el emparejamiento por puntuación de propensión (“propensity score matching”) los resultados a corto plazo fueron similares entre ambos grupos excepto la estancia hospitalaria que se mantuvo estadísticamente menor para el grupo de laparoscopia, para todos los tipos de colangiocarcinoma perihiliar según la clasificación de Bismuth e independientemente de la edad, tamaño del tumor y complicaciones severas postquirúrgicas. El tiempo quirúrgico, la tasa de R0, reintervención o fallecimiento a los 30 y 90 días, y otras complicaciones mayores como la hemorragia, la fístula biliar, absceso, e insuficiencia hepática también fueron similares entre ambos grupos sin alcanzar significación estadística. Este estudio sí demuestra el beneficio de la laparoscopia en la recuperación funcional postoperatoria de estos pacientes. Además, se encontró que un ASA (American Society of Anesthesiologists) mayor, la realización de hepaticoyeyunostomía y la mayor pérdida sanguínea intraoperatoria eran factores de riesgo de resultados adversos, especialmente, la pérdida sanguínea en cuanto a mayor tiempo de estancia hospitalaria y peor pronóstico a corto plazo.

2.1.4.6. Trasplante hepático

El uso de la laparoscopia para la hepatectomía del donante vivo está limitada a determinados centros especializados en todo el mundo y es un procedimiento en fase de desarrollo, que se debe realizar bajo aprobación ética de las instituciones correspondientes^{30, 31}. Hay evidencia de una mejora en la calidad de vida con menor estancia hospitalaria e incorporación laboral más temprana. Este procedimiento está estandarizado especialmente para el injerto lateral izquierdo empleado para el trasplante pediátrico.

2.1.5. Cirugía laparoscópica de los segmentos difíciles

Actualmente la laparoscopia está ampliamente generalizada, pero sigue presentando desafíos como la resección de lesiones en los segmentos posterosuperiores. Desde el inicio de la cirugía hepática laparoscópica, la resección de estos segmentos se ha considerado uno de los procedimientos más complejos debido a su difícil acceso, la mala visualización limitada

por el diafragma y las costillas (especialmente de las lesiones en la cúpula), la rigidez de los instrumentos laparoscópicos para acceder a ellos, la necesidad de movilizar el hígado, la mayor dificultad en el abordaje de sus pedículos y el control de una posible hemorragia⁴⁰.

En las primeras series publicadas, los tiempos quirúrgicos eran mayores, así como la tasa de conversión, siendo los tumores en los segmentos posterosuperiores un factor de riesgo independiente para la conversión, por lo que el abordaje habitual era un abordaje híbrido o asistido con la mano. Tras la evolución de las técnicas mínimamente invasivas y el abordaje puramente laparoscópico, con el aumento de la experiencia de los cirujanos, la mejora en el abordaje del pedículo glissoniano y el desarrollo de los instrumentos laparoscópicos, se han aumentado las indicaciones y establecido ciertas recomendaciones técnicas para la resección laparoscópica segura de estos segmentos.

Para acceder a estos segmentos se han descrito diferentes estrategias. En lugar del abordaje caudal de la laparoscopia que condiciona un difícil acceso a la parte superior del hígado, se puede realizar un abordaje lateral utilizando trócares intercostales (entre el 7º y 9º espacio intercostal) transdiafragmáticos con el paciente en posición lateral, accediendo de esta manera a la cara superior de los segmentos 7 y 8 con una visión directa y perpendicular de la vena hepática derecha y la vena cava [Figura 6²⁰], o un abordaje toracoscópico mediante técnicas como el VATS para lesiones localizadas bajo la cúpula diafragmática [Figura 7⁴¹].

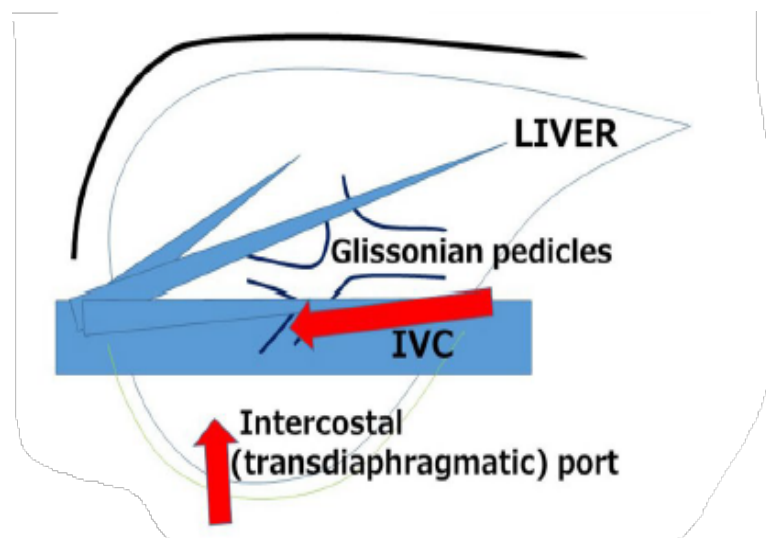


Figura 6²⁰. En el abordaje laparoscópico lateral, los puertos intercostales (transdiafragmáticos) junto a la movilización completa del hígado, pueden permitir el abordaje directo lateral y a los tumores localizados en segmentos posterosuperiores.

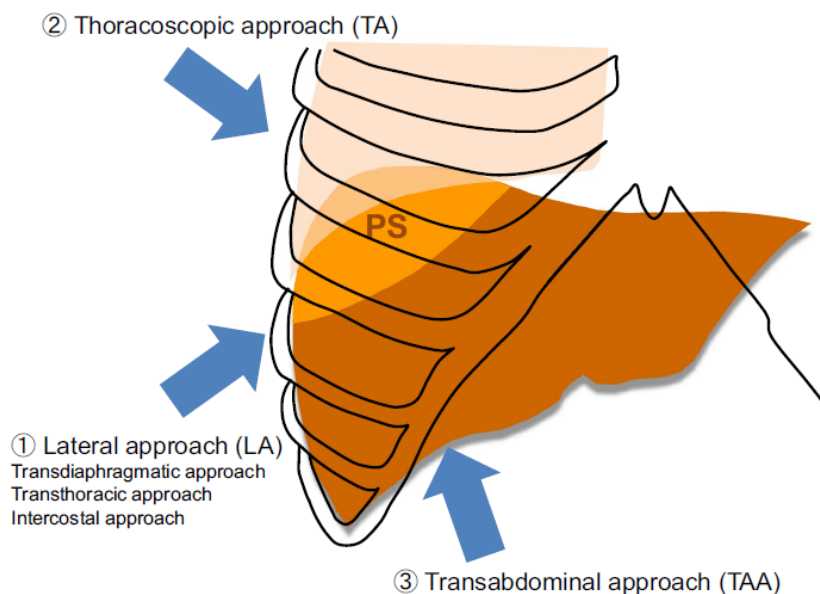


Figura 7⁴¹. Posibles abordajes para los segmentos posterosuperiores (PS) en la resección hepática laparoscópica.

Es necesario realizar una adecuada selección de los pacientes ya que se debe tener en cuenta la falta de neumoperitoneo y capacidad para realizar la maniobra de Pringle. Estos abordajes presentan complicaciones específicas, como lesiones pulmonares, neumotórax, hemotórax, hernias diafragmáticas, etc. Se debe identificar mediante una ecografía preoperatoria el borde inferior del pulmón para evitar su lesión con la incisión del trócar.

Sin embargo el abordaje laparoscópico transabdominal es el más utilizado. Para la movilización del lóbulo hepático derecho se requiere la sección de ambos ligamentos triangulares y coronarios junto con la disección de la reflexión retroperitoneal, para acceder a la parte posterior del lóbulo derecho, lo que requiere una amplia experiencia en la técnica laparoscópica.

Por otra parte, para facilitar el abordaje de estos segmentos, sería recomendable la estandarización de la posición del paciente, sin embargo, aún no está establecida entre los diferentes centros y especialistas. El paciente debe colocarse en una posición de semidecúbito o lateral izquierdo, o decúbito lateral izquierdo con el brazo derecho elevado, con el cirujano entre las piernas del paciente o a su lado derecho. Se puede emplear un rodillo colocado bajo la caja torácica para elevar el hígado y mejorar la exposición de la zona posterolateral derecha, con esta posición además la vena hepática derecha se sitúa por encima de la vena cava y puede ayudar a reducir el sangrado venoso.

Para el abordaje del segmento 7 es fundamental la movilización del hígado derecho, mediante la sección del ligamento falciforme, ligamentos coronario y triangular derechos, con la separación de la vena cava inferior hasta exponer la raíz de la vena hepática derecha. Para el segmento 8 en ocasiones es suficiente con la movilización del paciente en posición anti Tendelemburg y la retracción del ligamento falciforme hacia hipogastrio.

El abordaje de los pedículos glissonianos de estos segmentos puede ser intrahepático o extrahepático; sin embargo, el abordaje extrahepático a través del plano avascular siguiendo la disección de los pedículos anterior y posterior derechos desde el hilio hepático, puede causar lesiones iatrogénicas de los conductos biliares adyacentes. Además, es recomendable preparar la maniobra de Pringle de forma sistemática antes de la transección del parénquima en la resección laparoscópica de los segmentos posterosuperiores⁴².

Se realizó un análisis por subgrupos⁴² del estudio OSLO-COMET para las metástasis localizadas en los segmentos posterosuperiores (7 y 8) e incluyendo los segmentos 1 y 4a. Se recogieron 136 pacientes con al menos una lesión en estos segmentos; la tasa de complicación postoperatoria fue del 26% en el grupo de laparoscopia y del 31% en el grupo de cirugía abierta, sin diferencias significativas. El tiempo quirúrgico y las tasas de márgenes de resección < 1 milímetro fueron similares. La estancia hospitalaria fue menor en el grupo de cirugía laparoscópica de forma significativa, así como mejor calidad de vida relacionada con la salud a 1 mes. De los 62 pacientes del grupo de laparoscopia, en 2 se convirtió a cirugía abierta (perforación intestinal iatrogénica durante la adhesiolisis) y en 5 se recurrió a una cirugía laparoscópica asistida con la mano.

Nuestro grupo⁴⁰ analizó los resultados publicados en la literatura de las resecciones laparoscópicas de las lesiones localizadas en los segmentos 7 y 8, y los aspectos técnicos de su abordaje. La indicación más frecuente para la cirugía de estos segmentos fue las metástasis (55,4%) seguido del hepatocarcinoma (28,7%). La tasa de conversión fue entre el 0 y el 42,9%. La tasa de complicaciones menores fue entre 0-33,3%, y en caso de las complicaciones mayores un 0-10,8%. En comparación con la cirugía abierta, se ha observado menor estancia hospitalaria, pérdida sanguínea y complicaciones mayores, similares resultados oncológicos en caso del HCC, pero mayor tiempo operatorio y porcentaje de resecciones no anatómicas.

En este sentido, se deben tener en cuenta el tamaño, número y localización de las lesiones, ya que muchos autores consideran que para las lesiones > 5 centímetros o las situadas a una profundidad ≥ 3 centímetros debe realizarse un abordaje abierto⁴³.

En cuanto al segmento 1, el acceso caudal de la laparoscopia facilita su abordaje y visión pero requiere un alto nivel de experiencia. Como consideraciones específicas contiene múltiples ramas venosas que drenan directamente a la VCI por lo que aumenta el riesgo de sangrado durante su disección y separación de la misma, así como su cercanía al hilio hepático, aunque también se ha descrito su resección de forma segura.

En una revisión sistemática de 2017⁴¹ se describió la situación de la laparoscopia para estas lesiones dificultosas y sus resultados. El porcentaje de indicación de cirugía laparoscópica para el segmento 1 y los segmentos posterosuperiores es inferior (12-52%) que para el resto de segmentos (83-90%). Comparado con el resto de segmentos, la cirugía laparoscópica de los segmentos posterosuperiores presenta mayor pérdida sanguínea y tiempo quirúrgico que los segmentos anterolaterales, con mayor tasa de conversión a cirugía abierta, pero morbilidad y pronóstico similar, con complicaciones específicas como hernia diafrágica, fístula biliopleural, etc. Los resultados son comparables al resto de segmentos en comparación con la cirugía abierta.

La gran expansión de la cirugía mínimamente invasiva se ha producido gracias a la aparición de nuevas técnicas y nuevos instrumentos, como la ecografía intraoperatoria laparoscópica, la visión con cámaras de alta resolución o visión tridimensional y mayor magnificación y estabilidad, estudios con verde de indocianina, la planificación preoperatoria con modelos de simulación 3D para cuantificar el volumen del hígado remanente, valorar posibles variantes anatómicas y la localización del tumor, todo ello ha permitido a los cirujanos una mayor precisión en la visualización de la anatomía. Además, los avances en los instrumentos de energía, como el bisturí armónico, la pinza bipolar o el disector y aspirador ultrasónico, la adaptación a la laparoscopia de los hemostáticos a la laparoscopia y elementos de sección y sellado como grapadoras, clips, y suturas, han sido determinantes. Para la transección del parénquima y en cuanto a los dispositivos de energía no se han demostrado diferencias en cuanto a seguridad y eficiencia y deben emplearse a preferencia del cirujano.

Todo esto ha permitido que las indicaciones de la cirugía laparoscópica se hayan ido incrementando llevando a cabo las mismas técnicas que en la cirugía abierta, con iguales o mejores resultados. En los segmentos hepáticos que hasta entonces se consideraban de difícil acceso (1, 4a, 7 y 8) y constituían un límite para la laparoscopia, en los últimos años, se ha demostrado la viabilidad y seguridad de su resección laparoscópica. Igualmente se han publicado buenos resultados en centros experimentados en cuanto a los segmentos centrales, resección de varias lesiones bilobares o próximas a estructuras vasculares, o lesiones con tamaño > 5 centímetros. Sin embargo, estos procedimientos son realizados aún de forma abierta en la mayoría de centros no especializados y para este tipo de lesiones se indica de forma menos frecuente la resección laparoscópica. Se recomienda realizar estos procedimientos una vez alcanzada experiencia en las resecciones hepáticas de los segmentos anterolaterales³⁵.

2.2. CIRUGÍA ROBÓTICA

En las últimas décadas, la resección hepática mínimamente invasiva ha revolucionado el campo de la cirugía hepática, estableciéndose como un procedimiento con marcadas ventajas como una menor pérdida sanguínea, morbilidad y dolor postoperatorio, menor tiempo hasta la ingesta oral, tiempo de hospitalización, menor incidencia de hernias incisionales, mejor resultado estético y buenos resultados coste-efectivos, surgiendo como una estrategia superior a la cirugía abierta convencional incluso en patología maligna sin comprometer los resultados oncológicos.

La laparoscopia ha experimentado un gran desarrollo pero continúa presentando ciertas limitaciones, especialmente en ciertos pasos críticos que requieren una gran habilidad durante la hepatectomía, como la reconstrucción vascular o biliar compleja, una visión inestable y en general en dos dimensiones, una amplificación del temblor fisiológico del cirujano, una movilidad limitada por los instrumentos rígidos con limitación de la amplitud del rango de movimientos, peor ergonomía del equipo quirúrgico, y una curva de aprendizaje larga.

En términos generales se considera unánime que el abordaje estándar de la cirugía hepática moderna debe ser un abordaje mínimamente invasivo, complementado con estrategias híbridas o asistidas, y cirugía abierta en casos complejos o centros con menor experiencia en cirugía laparoscópica.

En este sentido la cirugía robótica ha surgido como el presente y futuro de la cirugía mínimamente invasiva. Su aparición supuso un cambio radical a nivel de algunas especialidades quirúrgicas, especialmente cuando se trata de un campo quirúrgico dificultoso, como es la pelvis en la cirugía urológica, ginecológica, o la cirugía colorrectal.

Como abordaje mínimamente invasivo la tecnología robótica presenta ciertas ventajas sobre la laparoscopia: aporta una visión del campo quirúrgico más estable, con visión tridimensional en alta definición, zoom mejorado, la flexibilidad y angulación de los instrumentos articulados que imitan el movimiento humano y facilitan la disección precisa de las estructuras, permitiendo el acceso a zonas anatómicas más difíciles, la ayuda del cuarto brazo para sostener ciertas estructuras (como por ejemplo el lóbulo derecho en la hepatectomía derecha que permite la identificación y control adecuado de las venas hepáticas accesorias durante la fase de la vena cava), o como recurso para comprimir zonas de sangrado de forma temporal, la habilidad para realizar una sutura intracorpórea precisa en localizaciones anatómicas complejas, la reducción del temblor fisiológico y la mejora de la ergonomía del cirujano.

Con la aprobación progresiva de la aplicación clínica y los desarrollos técnicos de los sistemas de cirugía robótica, la hepatectomía robótica se ha comenzado a realizar de forma gradual en la práctica. Sin embargo, debido a la reciente adopción de la cirugía robótica para las resecciones hepáticas más complejas, existen aún pocos ensayos clínicos aleatorizados y son limitados los datos en cuanto a los resultados intra y postoperatorios, así como para los resultados a largo plazo.

Los inicios de la cirugía robótica han simulado a los de la cirugía laparoscópica, comenzando con lesiones benignas o periféricas, en segmentos favorables (4b, 5, 6) o sección lateral izquierda (2 y 3). Con el avance de la técnica y el aumento de la experiencia, las indicaciones de la cirugía robótica se han ido expandiendo, siendo similares a las de la cirugía laparoscópica o la resección abierta. La cirugía robótica supera las limitaciones técnicas de la cirugía laparoscópica pero mantiene las ventajas de la cirugía mínimamente invasiva, lo que ha permitido aumentar el alcance y la complejidad de las intervenciones que pueden realizarse de esta manera.

Se recomienda categorizar como hepatectomía mayor a las resecciones hepáticas de los segmentos complejos (1, 4a, 7 y 8), al igual que en la laparoscopia. La resección de estos

segmentos es más dificultosa a nivel técnico debido a la necesidad de realizar una mayor transección del parénquima con proximidad a estructuras críticas y vasculares, en este aspecto, la cirugía robótica está demostrando ser un abordaje seguro y factible, en centros experimentados y con adecuada selección de los pacientes⁴⁴.

Nota et al.³³ realizaron un estudio internacional multicéntrico y publicaron resultados superiores a corto plazo de la resección robótica de los segmentos posterosuperiores comparado con la cirugía abierta. Masetti et al.⁴⁵ encontraron que en la cirugía robótica el tamaño de las lesiones localizadas en los segmentos posterosuperiores era mayor, lo que puede ser debido a que la cirugía robótica ofrece esas ventajas técnicas sobre la laparoscopia convencional que mejora los resultados a corto plazo de estos pacientes. Se ha descrito una bisectionectomía central robótica de un hepatocarcinoma en los segmentos 4 y 8, destacando la importancia de una adecuada exposición de la lesión, determinar la línea de transección, métodos adecuados de tracción, la maniobra de Pringle y la aplicación de imagen de fluorescencia con verde indocianina, sin necesidad de transfusión ni complicaciones postoperatorias⁴⁶; e incluso se ha realizado abordaje robótico del tumor de Klatskin, como este caso realizado por nuestro grupo en 2023⁴⁷ en el que se completó una hepatectomía izquierda con resección del segmento 1 más linfadenectomía, con hepatoeyunostomía en Y de Roux para dos radicales biliares.

La cirugía robótica se está convirtiendo en el foco de la cirugía hepática futura, y se encuentra en constante evolución. En comparación con la laparoscopia, la cirugía hepática robótica permitirá realizar resecciones cada vez más complejas y completar más procedimientos de forma totalmente mínimamente invasiva.

3. INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN CIRUGÍA

3.1. QUÉ ES LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

La inteligencia artificial (IA) es una rama de la ciencia informática capaz de analizar información compleja, al imitar las funciones cognitivas humanas, como el aprendizaje y las habilidades de resolución de problemas. Se define como “un campo de la ciencia e ingeniería que se ocupa de la comprensión computacional o informática de lo que suele denominarse

comportamiento inteligente, y de la creación de mecanismos que muestren dicho comportamiento”^{48, 49}.

Hoy en día, es un término general para el uso de modelos informáticos de comportamiento inteligente sin o con mínima intervención humana^{50, 48}. Sin embargo, la definición de la IA ha evolucionado a lo largo del tiempo debido a su rápido desarrollo.

El matemático británico Alan Turing, uno de los creadores de la ciencia informática moderna y de la inteligencia artificial, se planteó el “comportamiento” inteligente de un ordenador como la capacidad para simular las habilidades cognitivas humanas. Posteriormente un científico informático estadounidense, John McCarthy, acuñó el término “inteligencia artificial” en 1956, definiéndolo como “la ciencia e ingeniería para hacer máquinas inteligentes”, en una conferencia en el Dartmouth College donde se desarrolló el inicio de esta nueva disciplina^{50, 51}.

Actualmente la IA es considerada como una herramienta que aporta conceptos y soluciones novedosas para resolver tareas complejas. La IA se ha desarrollado en numerosos campos como la detección de objetos, reconocimiento de voz o el procesamiento del lenguaje.

En las últimas dos décadas se ha incrementado exponencialmente el interés en la IA (48). En 2015 se celebró un foro económico en Davos, donde Stephen Hawking manifestó su temor de que la IA pudiera remplazar a la humanidad, y se pueda considerar como una amenaza para el sistema financiero, en el campo militar, de seguridad y transporte. El Foro Económico Mundial de 2016 nombró el ecosistema de la inteligencia artificial como una de las 10 tecnologías emergentes más importantes⁵⁰.

3.2. MODELOS DE IA

La IA engloba muchos términos y modelos [Figura 8⁵²]. En el campo de la medicina encontramos principalmente el uso de IA “data-driven”, que consiste en aquella categoría que emplea gran cantidad de datos para crear modelos de predicción y decisión, lo más utilizado son las redes neuronales artificiales, el aprendizaje automático y el aprendizaje profundo. Otros métodos son las redes bayesianas, árboles de regresión, el procesamiento del lenguaje natural o la lingüística computacional, etc.

Desde los comienzos de la aplicación de la IA en medicina, el recurso más popular han sido las redes neuronales artificiales. Son modelos matemáticos que imitan el procesamiento de la información del sistema nervioso del cerebro humano, y consisten en redes de procesadores informáticos altamente interconectados que son capaces de realizar cálculos o analizar relaciones complejas no lineales. Su capacidad para aprender y actualizar información, reconocer y crear patrones, manejar datos imprecisos y estandarizarlos para su aplicación lo convierten en una herramienta muy útil en medicina⁴⁸. Baxt⁵³ fue uno de los primeros investigadores en explorar el potencial de las redes neuronales, desarrollando un modelo para el diagnóstico del infarto agudo de miocardio. Stamey et al.⁵⁴ crearon un algoritmo a través de una red neuronal para clasificar las lesiones prostáticas en benignas o malignas, con alta sensibilidad y especificidad. Existen sistemas de screening basados en esta tecnología para el estudio de la citología cervical, tiroidea o peritoneal. Se pueden emplear también para la interpretación de imágenes radiológicas y otras pruebas complementarias. A nivel pronóstico, es un recurso útil para la toma de decisiones terapéuticas, al valorar pacientes de alto riesgo o predecir datos de supervivencia y resultados en pacientes oncológicos o pacientes críticos.

En 2006, Hinton et al.⁵⁵ publicaron en “Science” un modelo de red neuronal artificial con múltiples capas ocultas y una capacidad de aprendizaje excepcional, que condujo al estudio del aprendizaje profundo (“deep learning”). El aprendizaje profundo consiste en el modo de aprendizaje que no tiene elementos predefinidos, procesados, si no que aprende patrones de forma directa a través del análisis de múltiples conjuntos de datos al mismo tiempo, y de la realización de evaluaciones sucesivas a partir del resultado de la evaluación previa (esto es conocido como las capas ocultas o “hidden layers”) hasta alcanzar un resultado definitivo⁵¹. Es decir, no se utilizan datos introducidos por los investigadores, si no que se reclutan de forma automática datos asociados con un resultado clínico concreto. El aprendizaje profundo consiste en tareas de entrenamiento basadas en una gran cantidad de datos, aprendiendo de ellos y haciendo predicciones a través de la incorporación flexible de nuevos datos. Ha experimentado un gran desarrollo en la última década gracias a los avances en la informática y la creación de algoritmos, sistemas de hardware, y a la disponibilidad de información y grandes bases de datos. Se trata de modelos de IA altamente complejos y que están surgiendo con el objetivo de analizar datos sanitarios complejos.

La IA y en particular los algoritmos de aprendizaje profundo están ganando popularidad en el ámbito médico por su aplicación con éxito en tareas de reconocimiento, procesamiento y clasificación de imágenes, tanto radiología, ecografía y medicina nuclear, realizando un análisis cuantitativo automático de las características de las imágenes médicas y realizando a partir de ello un diagnóstico⁵⁶. Ejemplos de ello son la predicción del riesgo cardiovascular basado en imágenes de retina, la clasificación de lesiones cutáneas, o la detección del cáncer de mama basado en la mamografía⁵⁷.

En medicina, las redes neuronales artificiales son los principales algoritmos empleados para el aprendizaje profundo. Las redes neuronales convolucionales son un tipo de redes neuronales artificiales, y son las más utilizadas en el aprendizaje profundo en el campo del análisis de imágenes médicas por su capacidad para procesar información espacial⁵⁸. Las redes neuronales convolucionales tienen patrones de conexión similares a los de la corteza visual de los animales y permiten detectar características espaciales inherentes en imágenes de alta dimensión⁵².

El aprendizaje automático en cambio está basado en parámetros determinados y definidos por los investigadores, asociado a ecuaciones matemáticas por lo que pueden ser cuantificados. Es el aprendizaje de patrones basado en la experiencia, es decir, de ser capaz de modificar su procesamiento al adquirir nuevos datos, para crear modelos descriptivos o predictivos⁵⁹. El aprendizaje automático puede dividirse en aprendizaje supervisado, no supervisado y de refuerzo⁶⁰. Los algoritmos de aprendizaje supervisado se entrenan con datos de muestra asociados a resultados determinados, y su objetivo es aprender la relación entre ambos para realizar predicciones cuando se introducen nuevos datos de entrada.

Entre los algoritmos de aprendizaje supervisado se encuentran la regresión lineal, la regresión logística, Random Forest, etc. En cambio, los algoritmos de aprendizaje no supervisado son entrenados con datos de muestra no etiquetados y analizan la relación subyacente para descubrir nuevos patrones. Puede revelar patrones que ocurren de forma natural sin un resultado predefinido. El aprendizaje automático por tanto utiliza unos datos determinados (aprendizaje supervisado) o la estructura detectada en los propios datos (aprendizaje no supervisado) para explicar o hacer predicciones sobre los datos sin necesidad de una programación

para ello. El aprendizaje supervisado es útil para entrenar un algoritmo de aprendizaje automático para predecir un resultado conocido, mientras que el no supervisado es útil para buscar patrones dentro de los datos.

Los algoritmos de aprendizaje automático sirven para proponer un proceso de toma de decisiones para ayudar a resolver problemas complejos, en los que existen múltiples factores que pueden influir en la decisión más adecuada, para cada paciente y situación. Estos algoritmos, comparado con los modelos tradicionales o modelos de riesgos proporcionales, son más practicables y mejor interpretados⁶¹.

Sin embargo, a diferencia del aprendizaje automático, el aprendizaje profundo consta de gran cantidad de parámetros libres, no predefinidos, lo que lo convierte en un modelo más flexible y preparado para el procesamiento y clasificación de bases de datos complejas, y por tanto es más frecuente en el campo de la hepatología. En medicina, los modelos empleados tradicionalmente suelen ser paramétricos, como la regresión lineal, y por tanto están más limitados por su escasa flexibilidad para el análisis de datos. El uso de modelos de IA tiene como ventaja la capacidad de analizar en mayor detalle el significado o naturaleza de datos complejos o imprecisos, extraer patrones y detectar tendencias, lo que lo convierte en un recurso apropiado al ámbito médico. Los algoritmos de aprendizaje profundo han superado a los algoritmos tradicionales de aprendizaje automático en cuanto a la clasificación de imágenes y reconocimiento de voz, demostrando excelentes resultados en la enfermedad hepática. Ambos tipos de aprendizaje se pueden combinar⁶².

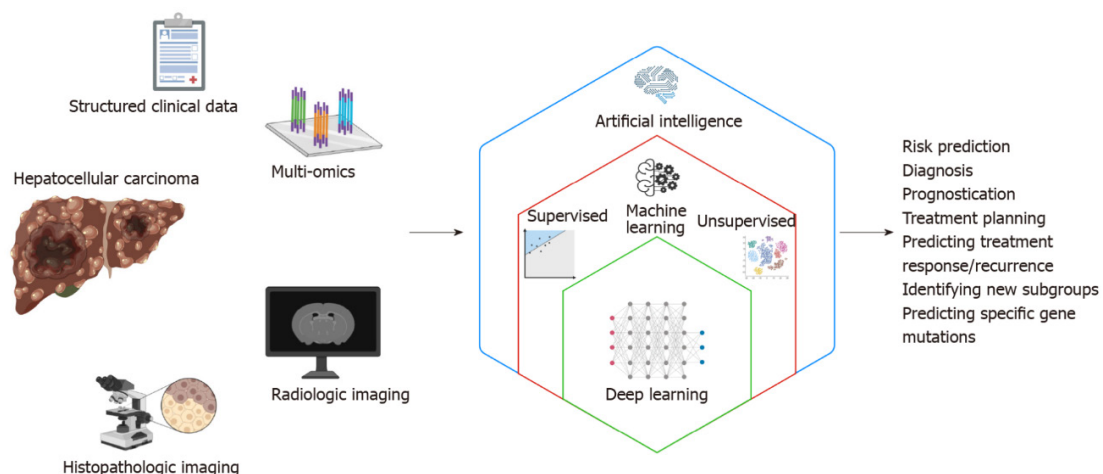


Figura 8⁵². Representación esquemática de los diferentes términos y algoritmos de IA, y posibles escenarios de aplicación de los mismos (en esta figura en relación al hepatocarcinoma).

Otra ventaja de todos estos modelos es que no son estáticos, con el tiempo y la inclusión de nuevos datos, progresan de forma exponencial. La siguiente aplicación más frecuente es la posibilidad de predicción o pronóstico de una patología o técnica. Esto influye de forma directa en el proceso de toma de decisiones médicas en cuanto al manejo del paciente, en las que se deben tener en cuenta múltiples factores y con resultados heterogéneos.

3.3. IA EN MEDICINA

Desde la mitad del siglo pasado, se está comenzando a explorar la utilidad y aplicaciones de la inteligencia artificial en prácticamente todos los campos de la medicina. Su potencial para identificar patrones que generalmente no son obvios con las técnicas tradicionales, analizar relaciones y extraer resultados a partir de un conjunto de datos (especialmente dada la compleja naturaleza de los datos médicos) puede emplearse en el proceso diagnóstico, la toma de decisiones terapéuticas mediante estratificación del riesgo, y la predicción de resultados en muchos escenarios clínicos.

En sus inicios, la IA no fue bien acogida por la comunidad médica, debido a la reticencia en el uso de la tecnología como parte del proceso clínico y especialmente en la toma de decisiones. Ya Ramesh et al.⁴⁸ en 2004 deducen la importancia del papel que la IA puede desempeñar en el ámbito de la salud en el siglo XXI, con la necesidad de seguir realizando estudios para demostrar su eficacia en mejorar y complementar la atención sanitaria. El uso de herramientas de IA en la asistencia sanitaria en Estados Unidos se espera que genere un ahorro anual de costes superior a los 300.000 millones de dólares⁶³.

Se considera que la IA en medicina tiene dos ramas principales: la virtual y la física. La rama virtual incluye los avances informáticos en relación a los algoritmos matemáticos que aumentan su propio aprendizaje conforme a la experiencia. Gracias a esta parte virtual, la IA ha realizado avances en medicina genética, medicina molecular y radiología. La rama física consiste en los dispositivos destinados a asistir bien al personal sanitario o a los pacientes. Actualmente existen robots con sistemas de IA destinados a asistir a personas de edad avanzada, con deterioro cognitivo o limitaciones físicas, o robots destinados a comunicarse y enseñar a niños con trastornos del espectro autista. También puede incluir nuevas tecnologías, como por ejemplo los nanorobots, para la administración de fármacos dirigidos a ciertas lesiones u órganos.

En estos casos, así como en otras posibles situaciones futuras que surjan del desarrollo de la robótica en medicina, se debe plantear el aspecto ético, de cara a incorporar dichos dispositivos en el ámbito sanitario de forma rutinaria⁵⁰.

Hay que enfatizar en el concepto de que la IA no está destinada a reemplazar a la parte humana, si no a apoyar la atención médica, ayudar a la toma de decisiones, pudiendo ser útil en la realización de tareas automáticas demandantes, y por tanto ayudar a reducir la carga de trabajo y los tiempos de espera que existen en la actualidad asociado al aumento de la demanda de pruebas médicas e intervenciones. Además, existen herramientas que no son perfectas y necesitan supervisión por especialistas para comprobar su fiabilidad. La IA no es capaz de realizar asociaciones subjetivas como el cerebro humano, también relevantes para la práctica clínica. Sin embargo, al contrario que el ser humano, la IA no ve reducida su precisión por factores externos como por ejemplo el tiempo o el cansancio, obteniendo resultados más objetivos, cuantitativos y reproducibles.

En este sentido, el rápido desarrollo que ha experimentado la tecnología de la IA en los últimos años debe implementarse de forma rigurosa y controlada, existiendo controversia en los tiempos adecuados para instaurar métodos totalmente automáticos en la práctica clínica. Así mismo se enfrenta a otros desafíos como son la falta de datos precisos, la dificultad para interpretar los modelos de IA, las cuestiones éticas, de privacidad y heterogeneidad de los datos, etc.

Se puede pronosticar un amplio uso de la IA en el ámbito clínico: la investigación sanitaria, el manejo de grandes cantidades de datos por paciente, la necesidad de adaptar algoritmos a características individuales para optimizar decisiones clínicas, etc. El futuro de la IA en medicina está encaminado hacia la globalización, con la creación de redes interconectadas de identificación y recopilación de grandes bases de datos de pacientes de todo el mundo para favorecer su desarrollo y perfeccionamiento en base a las diferentes características demográficas de los pacientes, zonas geográficas o patologías. De esta manera, se aumenta su validez externa y el beneficio de su aplicación podrá ser ampliado a todos los campos y sociedades⁵⁶. Para conseguir afianzar la tecnología de la IA en la práctica clínica, existen una serie de retos como la necesidad de desarrollar métodos consistentes para la recogida de datos, su divul-

gación y almacenamiento, y la necesidad de crear guías consensuadas por investigadores y expertos de diferentes ámbitos. Se debe demostrar que los resultados y predicciones de la IA funcionan realmente en el ámbito clínico comparando el rendimiento de los algoritmos con el de los sistemas convencionales y realizando estudios de calidad⁶⁴.

3.3.1. Aplicaciones de la IA en medicina

La IA se puede aplicar en múltiples campos de la medicina, especialmente aquellos que se basan en el análisis de información de imágenes, como la radiología, la patología, la dermatología o la oftalmología. Las tres modalidades de imagen más frecuentes en las que se basan los estudios de aprendizaje automático y profundo son la el TC, la RM, y los cortes histopatológicos con tinción de hematoxilina-eosina⁶².

En las últimas décadas se ha producido un avance en las técnicas de imagen que ha jugado un papel esencial en la detección temprana, diagnóstico y tratamiento de diferentes patologías, como el TC, la RM, la ecografía y las imágenes de medicina nuclear como el PET⁵⁶. Esto se debe a los avances tecnológicos y la mayor accesibilidad y disponibilidad de información.

Al adquirir experiencia, el ser humano mejora su capacidad en la toma de decisiones. La interpretación de imágenes se basa en esa adquisición de experiencia y en el conocimiento, pero el campo de la radiología puede verse influenciado por una interpretación subjetiva. Además, la mente humana tiene un límite en cuanto al almacenamiento de información y datos. Se calcula que un radiólogo puede analizar unas 225.000 imágenes de TC y RM aproximadamente durante 40 años de profesión⁶⁵, mientras que la IA puede analizar millones de pruebas de imagen y en periodos más cortos de tiempo. Con esto además, aumenta su experiencia y por tanto su precisión.

Hoy en día la IA es extensamente utilizada en el campo de la radiología. Para la transformación de los datos radiológicos en información clínica, la IA puede funcionar principalmente de dos formas: la radiómica (derivada del aprendizaje automático clásico) y los sistemas de aprendizaje profundo con las redes neuronales convolucionales. La radiómica es un enfoque supervisado por expertos en el que algoritmos codificados extraen características cuantitativas

que se introducen en un algoritmo de aprendizaje automático. En cambio, las redes neuronales convolucionales del aprendizaje profundo realizan una extracción automática de datos en las que el algoritmo aprende por sí mismo las características más destacadas a través de operaciones matemáticas en múltiples capas⁶².

Como ejemplos a nivel práctico, existen sistemas de diagnóstico que detectan y resaltan el sangrado intracraneal en imágenes de TC, algoritmos para detectar el calcio en las arterias coronarias en los TC torácicos sin contraste, así como algoritmos que detectan osteoporosis al calcular la densidad mineral ósea, detección de metástasis ganglionares o lesiones malignas en la mamografía, tumores intracraneales en la RM, sistemas para la detección temprana de lesiones del tracto gastrointestinal en las imágenes endoscópicas, etc. [Figura 9⁵⁸].

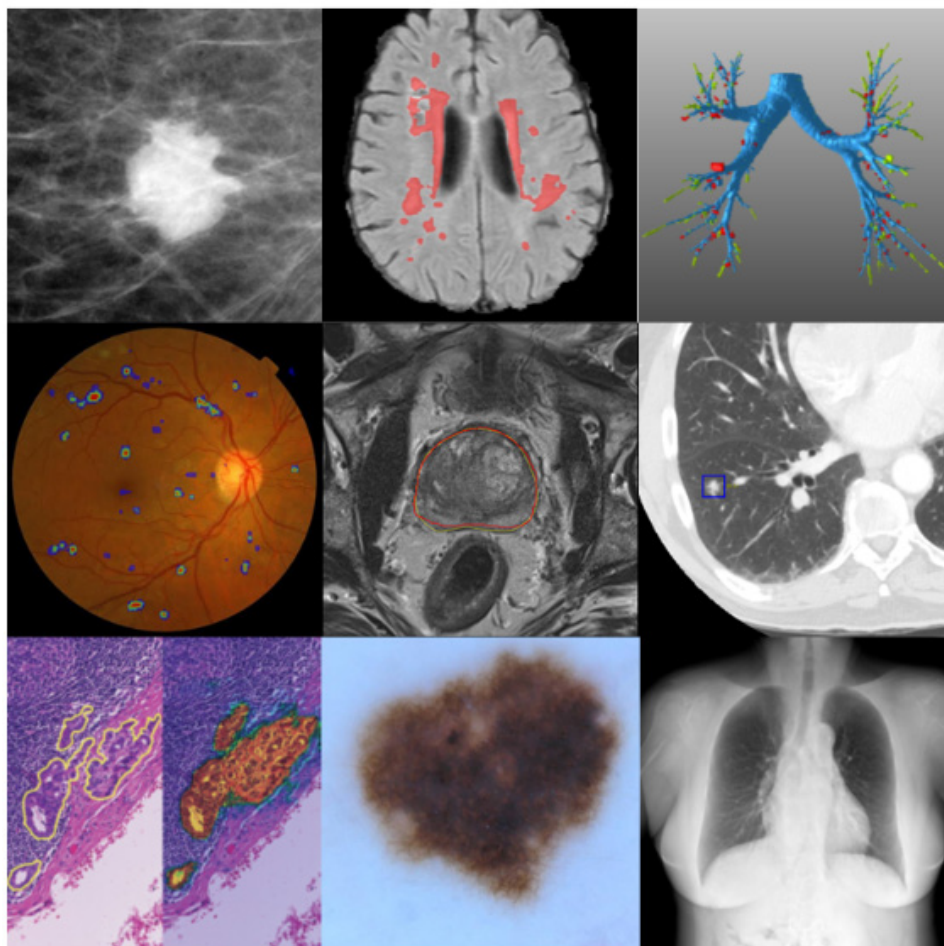


Figura 9⁵⁸. Imágenes médicas en las que se aplica el aprendizaje profundo. De arriba a la izquierda a esquina inferior derecha: mamografía, segmentación de lesiones cerebrales, detección de fugas en la segmentación de las vías respiratorias, retinopatía diabética, segmentación de la próstata, clasificación de nódulos pulmonares, imagen histopatológica de metástasis linfática de cáncer de mama, clasificación de lesiones cutáneas, supresión ósea en radiografía de tórax.

Sin embargo, las diferentes pruebas de imagen como la ecografía, TC o RM constan de distintos parámetros de adquisición de imágenes, protocolos, y métodos de reconstrucción que pueden afectar a la extracción y análisis de los datos y por tanto su reproducibilidad. Se necesitan bases de datos amplias, multicéntricas y con diversidad epidemiológica, que representen todas las posibles patologías y poblaciones, en las que deben colaborar diferentes sociedades nacionales e internacionales, para ayudar a la creación de criterios y estandarización sobre la metodología de interpretación de imágenes por la IA.

En otros campos, como en la oncología, las aplicaciones de la IA han demostrado obtener buenos resultados en cuanto al diagnóstico del cáncer de mama y su estadificación, la detección de cáncer de pulmón, y la clasificación de lesiones dermatológicas por imagen.

En el campo de la cardiología, existen herramientas de IA para la lectura e interpretación automática de electrocardiogramas, el análisis de datos de la ecocardiografía con 3D para proporcionar información sobre la función cardíaca, o la detección de pacientes con riesgo de fallo cardíaco⁵¹.

3.3.2. IA en hepatología

La hepatología es la especialidad que se encarga del estudio, diagnóstico y tratamiento de un amplio espectro de enfermedades metabólicas, infecciosas, autoinmunes y neoplásicas del hígado. Para ello, se recoge información tanto cualitativa como cuantitativa procedente de múltiples fuentes, como la historia clínica, la exploración física, los test de laboratorio y las pruebas de imagen. Los pacientes que presentan una lesión o enfermedad hepática se someten a múltiples estudios de imagen para el diagnóstico, planificar la estrategia terapéutica, para realizar control de la enfermedad y evaluar la respuesta al tratamiento.

El uso de la IA en la hepatología se ha expandido después de su desarrollo en la gastroenterología⁵⁹; sus aplicaciones y avances para la enfermedad hepática han aumentado en los últimos años. En hepatología, la IA puede emplearse para detectar y cuantificar la fibrosis, diagnosticar la enfermedad grasa no alcohólica y la cirrosis, así como realizar un pronóstico, diagnosticar lesiones focales y diferenciar lesiones benignas y malignas.

Hoy en día, uno de los retos de la hepatología es la progresión de la enfermedad hepática crónica, como las hepatitis víricas o la enfermedad alcohólica, que puede desembocar en la aparición de cirrosis o de un hepatocarcinoma, por lo que es imprescindible un seguimiento estrecho de estos pacientes para realizar un diagnóstico y tratamiento precoces. Además, existe una falta de consenso en cuanto a la estrategia terapéutica de algunas enfermedades hepáticas, por lo que la toma de decisiones puede ser compleja⁵⁹.

Al igual que en el resto de especialidades, la aplicación de la IA más empleada en la hepatología y la que mayor desarrollo ha experimentado es el diagnóstico a partir de pruebas de imagen⁶². Especialmente útil en el caso del estudio mediante TC y RM, ya que se trata de pruebas objetivas y con gran parte de sus criterios estandarizados, al contrario que la ecografía. La ecografía es la técnica más empleada como primera aproximación para las enfermedades del hígado, pero actualmente la RM es una herramienta indispensable para el estudio de la patología y lesiones hepáticas. Sin embargo, presenta ciertas contraindicaciones y limitaciones, como los artefactos de movimiento que en ocasiones producen una calidad de imagen insuficiente, o un largo tiempo de adquisición de las imágenes. En este sentido, una línea de investigación prometedora es la radiómica, especialmente a nivel de las imágenes de RM y para enfermedades menos frecuentes como la colangitis biliar o la colangitis esclerosante primaria⁶⁴.

En cuanto a la patología benigna, se han desarrollado redes neuronales convolucionales para la detección de la cirrosis y enfermedad grasa hepática mediante ecografía, así como métodos para detectar y estadificar mediante análisis cuantitativos la fibrosis en la enfermedad hepática crónica, tanto por imágenes de TC como RM, así como la elastografía, con modelos de aprendizaje profundo. Estos métodos no invasivos de estudio pueden suponer una alternativa a la biopsia hepática, que en estos pacientes supone una técnica de riesgo con posibles complicaciones, por lo que son recomendables test no invasivos para su diagnóstico y clasificación.

En patología maligna, los algoritmos de aprendizaje profundo aplicados a las diferentes modalidades de imagen se han utilizado ampliamente para la detección de lesiones hepáticas focales, objetivando características más detalladas de la lesión y por tanto con la capacidad de hacer un diagnóstico más preciso. Por ejemplo, los modelos de aprendizaje profundo aplicados

a imágenes de ecografía o TC con diferentes fases de contraste, son capaces de detectar nódulos hepáticos con un elevado porcentaje de verdaderos positivos y diferenciar entre los diferentes tipos de lesiones, benignas o malignas (hepatocarcinoma, hemangiomas, quistes hepáticos o masas indeterminadas)⁶⁶. Todos estos sistemas aumentan su rentabilidad si se combinan con la información clínica y con la evaluación humana.

Ben-Cohen et al.⁶⁷ desarrollaron un modelo de redes neuronales convolucionales que predecía el origen primario de las metástasis hepáticas entre cuatro posibles: melanoma, cáncer colorrectal, cáncer de páncreas y cáncer de mama, mediante el análisis de imágenes de TC. Este sistema alcanzó una precisión del 56% en la localización del cáncer primario. Este tipo de herramientas presenta una potencial utilidad de cara a dirigir el tratamiento oncológico más adecuado. Igualmente se han empleado redes neuronales artificiales para realizar estudios volumétricos y calcular la carga tumoral en estudios de TC, pudiendo emplearse esta información para valorar la progresión de la enfermedad y la respuesta al tratamiento⁵⁶.

En cuanto al hepatocarcinoma, el aprendizaje automático se puede aplicar para evaluar el riesgo de desarrollo, el diagnóstico y predecir la respuesta al tratamiento y supervivencia, con buenos resultados comparado con el diagnóstico mediante marcadores tumorales o scores de predicción del riesgo. Predecir la progresión de la enfermedad hepática crónica (desarrollo de cirrosis y complicaciones, como la aparición de hipertensión portal, varices gastroesofágicas, o la agresividad del tumor en función de características genéticas) puede orientar sobre el seguimiento a realizar y la selección del tratamiento más adecuado para estos pacientes. Estas predicciones realizadas en base a los datos de la IA deben interpretarse con precaución, especialmente su influencia a la hora de tomar decisiones médicas y llevarlas a cabo en la práctica, ya que la enfermedad hepática puede estar influenciada por la situación basal del paciente, la función hepática, la localización, factores ambientales, etc. Igualmente, la posibilidad de predecir la respuesta de un paciente con hepatocarcinoma a los diferentes tratamientos, como la quimioterapia, o terapias locorregionales como la radioterapia o la quimioembolización transarterial, mediante modelos que combinan la información clínica con imágenes de TC o RM, puede ayudar a evitar procedimientos innecesarios y reducir los costes, seleccionar los pacientes óptimos, y evitar la iatrogenia, como por ejemplo al planificar la dosis de un tratamiento para minimizar la toxicidad hepática^{56, 62}.

En el campo de las imágenes médicas la segmentación consiste en delimitar un órgano, una lesión u otras estructuras de interés en una prueba de imagen. Las redes neuronales convolucionales se emplean para estas tareas de segmentación, pudiéndose aplicar además sistemas tridimensionales, y son útiles para establecer áreas de ablación y otras terapias locorreregionales a partir de la anatomía por RM o TC. Bulat et al.⁶⁸ lograron realizar una segmentación precisa de la vena porta a partir de imágenes de TC para pacientes programados para radioterapia corporal estereotáctica. Lu et al.⁶⁹ emplearon este sistema con imágenes de TC para pacientes candidatos a trasplante hepático de donante vivo.

El segundo campo de aplicación más frecuente y en desarrollo de la IA en cuanto al estudio del hígado es la histología⁶⁴. En este caso, una de las desventajas es que la fuente de datos es más limitada, ya que la mayoría de centros a día de hoy continúan empleando los portaobjetos manuales de vidrio y son minoría los que digitalizan sus muestras de forma sistemática. Al igual que en la radiología, la histología se basa en una interpretación subjetiva de las imágenes por el especialista, por lo que el uso de la IA en este campo puede ayudar a su reproducibilidad al describir las características anatomopatológicas de forma cuantitativa, objetiva y uniforme.

En los últimos años, se han realizado varios estudios con modelos de IA para clasificar y diagnosticar tejido de muestras de lesiones malignas hepáticas, como Kiani et al.⁷⁰ que aplicaron redes neuronales convolucionales en imágenes de cortes histológicos de tumores hepáticos con tinción de hematoxilina-eosina, para diferenciar entre hepatocarcinoma y colangiocarcinoma. Posteriormente se evaluó la eficacia del modelo como herramienta de ayuda para once patólogos con diferentes niveles de experiencia con buenos resultados.

Se han desarrollado también modelos de aprendizaje profundo para calcular scores de riesgo mediante la combinación de aspectos clínicos, biológicos, radiológicos e histológicos, para predecir la supervivencia y recurrencia del HCC tras la resección hepática o el trasplante. Estos modelos suponen un campo de interés reciente, que tienen como fin establecer mejores factores pronósticos y destacar el potencial de la histopatología como herramienta importante en la toma de decisiones clínicas.

Otra área de investigación es la genómica. En 2018 el Centro Nacional de Cáncer de Hígado de China comenzó un screening prospectivo multicéntrico en pacientes de alto riesgo, mediante la detección temprana de marcadores séricos para neoplasias de hígado con técnicas de secuenciación genómica, de cara a realizar un tratamiento precoz y dirigido⁷¹.

3.4. IA EN CIRUGÍA

La IA tiene el potencial de revolucionar la cirugía en los próximos años. La primera aplicación de la IA en el campo de la cirugía se puede atribuir a Gunn en 1976, cuando investigó la posibilidad de diagnosticar el dolor abdominal agudo con un análisis informático.

Las técnicas y recursos de la IA pueden ofrecer una perspectiva novedosa nuevas herramientas para el manejo del paciente. Sin embargo, en esta especialidad, se enfrenta a varios desafíos específicos que hasta ahora han enlentecido su desarrollo. Estos desafíos involucran la recopilación de datos, el desarrollo de dispositivos, y la integración de la información.

Al contrario que en otros ámbitos, que se fundamentan en el análisis de imágenes estáticas, la cirugía se basa en el procesamiento de la información en un entorno dinámico, a tiempo real, incluyendo múltiples variables como el paciente, equipo quirúrgico, conocimiento del cirujano basado en las experiencias previas o las guías clínicas, etc. El aprendizaje profundo requiere de grandes cantidades de datos para su entrenamiento, que sean de calidad y heterogéneos, lo cual es complejo en el ámbito quirúrgico, debido a que el curso de una cirugía depende de numerosos factores y es difícil predecir variaciones en el mismo. Actualmente existen pocas fuentes de información pública para la creación de algoritmos en cirugía.

Hoy en día los algoritmos de aprendizaje profundo pueden analizar el uso de los instrumentos laparoscópicos, la cinemática, la información de las cámaras, determinar la duración de la cirugía; de esta manera, se pueden resaltar estructuras objetivo y posibles zonas de riesgo.

A día de hoy, no están definidas todas las posibles aplicaciones de la IA en cirugía. En el campo de la cirugía general la IA ya se emplea para el diagnóstico, evaluación de los riesgos, el análisis intraoperatorio de imágenes, la automatización del quirófano, predicción de complicaciones anestésicas y quirúrgicas (infección del sitio quirúrgico, sepsis, neumonía, infecciones urinarias, complicaciones cardíacas, estancia en UCI, sangrado en cirugía hepática,

pancreática y colorrectal, fuga anastomótica en cirugía bariátrica y colorrectal, fistula pancreática, dolor...) y la optimización de los cuidados postoperatorios.

Uno de los aspectos relevantes de la cirugía general es la elección del tratamiento ideal para cada paciente, por lo que el desarrollo de algoritmos de tratamiento personalizados es uno de los principales objetivos de la implementación de la IA en esta área.

En la cirugía la IA puede aplicarse fundamentalmente a tres niveles: el apoyo a la toma de decisiones, la asistencia en el entorno o asistencia contextual, y la robótica cognitiva⁵⁷.

Los sistemas para el apoyo en la toma de decisiones son aquellos que reúnen información del paciente para ofrecer una recomendación clínica. En el escenario preoperatorio, se valoran los resultados de las pruebas complementarias, características del paciente, comorbilidades y medicación, para orientar el tratamiento quirúrgico más adecuado, así como estratificar los riesgos perioperatorios. Un ejemplo de estos scores de riesgo preoperatorio para valorar la mortalidad y posibles complicaciones es el ASA, empleado a nivel mundial. Sin embargo, suele tratarse de modelos lineales incapaces de tener en cuenta variables flexibles y sus relaciones. De esta limitación ha surgido el desarrollo de las redes neuronales, que conforman algoritmos capaces de resolver asociaciones complejas entre variables a través de conjuntos de datos y evaluar su rendimiento. Estas redes se pueden emplear para el desarrollo de algoritmos de riesgo en el ámbito preoperatorio, especialmente en cuanto al desarrollo de complicaciones postquirúrgicas y riesgo de mortalidad.

Esta revisión de la literatura⁶⁰ analiza las herramientas disponibles de la IA en el manejo perioperatorio de la cirugía gastrointestinal mayor. Para la planificación preoperatoria de una patología gastrointestinal se emplea una combinación de imágenes anatomopatológicas, radiológicas, y endoscópicas. El análisis digital de cortes de histopatología por algoritmos de IA ha demostrado identificar y clasificar con éxito pólipos de colon, grado de displasia, inestabilidad de microsátélites o grado de fibrosis hepática. En las imágenes endoscópicas se diferencian pólipos hiperplásicos de adenomatosos o se identifica la profundidad de invasión y los márgenes de la resección endoscópica. Las imágenes ecográficas de alta resolución permiten evaluar la actividad de la enfermedad de Crohn. Esto requiere de un buen almacenamiento de datos y equipos y redes eficientes. A nivel intraoperatorio también han surgido avances en el

campo de la anestesiología, con robots de intubación mediante laringoscopio, monitorización de la relajación a través de los diferentes parámetros evaluados con ajuste automático de la infusión de los fármacos anestésicos, predicción de la hipotensión o tiempo de recuperación de bloqueos neuromusculares.

En una revisión sistemática de Spinelli et al.⁷² se estudió el papel actual de la IA en la cirugía colorrectal, al tratarse de una especialidad tan amplia, con el objetivo de definir sus aplicaciones perioperatorias e identificar tareas adicionales en las que su uso podría ser relevante. En la fase preoperatoria, la IA puede crear algoritmos basados en los datos clínicos para la predicción del estadiaje del cáncer colorrectal, algoritmos de tratamiento personalizados, redes neuronales artificiales para predecir el intervalo entre el diagnóstico y el tratamiento quirúrgico para personalizar la optimización preoperatoria, y evaluar el riesgo de complicaciones (infección del sitio quirúrgico, fuga de anastomosis o viabilidad del pouch ileal, en base a factores preoperatorios como el diagnóstico inicial, la diabetes o el tipo de resección).

La radiómica se puede emplear para predecir los resultados quirúrgicos y la supervivencia, como modelos que pueden predecir una respuesta patológica completa tras el tratamiento adyuvante y evaluar características biológicas del cáncer de recto (como la mutación KRAS) basándose en las imágenes de RM y datos clínicos, o predecir metástasis hepáticas y la respuesta de las mismas tras el tratamiento con QT.

En cuanto al apoyo en la toma de decisiones clínicas, se han desarrollado herramientas basadas en el aprendizaje profundo empleando datos clínicos y datos del centro hospitalario y de las guías clínicas para recomendar una estrategia de quimioterapia-cirugía óptima. También modelos genéticos para identificar pacientes en estadio I y II con mayor riesgo de recurrencia, integración de sistemas de clasificación (por ejemplo, la escala de Hinchey modificada con la de la American Association for the Surgery of Trauma para la diverticulitis aguda).

En la fase intraoperatoria, se plantea la integración de la IA en las plataformas robóticas para que adquieran autonomía en la realización de ciertas tareas como el análisis de la anatomía del paciente (modelos que combinan imágenes intraoperatorias hiperespectrales, espectroscopia de reflectancia difusa, verde indocianina, etc. capaces de diferenciar tejido colorrectal sano de tumoral, o la microperfusión para predecir el riesgo de fallo de la anastomosis)

y de las habilidades quirúrgicas. En la fase postoperatoria, la IA puede influir en los protocolos tipo ERAS (Enhanced Recovery After Surgery), con la identificación de estrategias de manejo específicas para mejorar los resultados, por ejemplo, en cuanto a estancia hospitalaria o tasas de reingreso.

Existen modelos de aprendizaje automático para predecir las complicaciones postquirúrgicas como el sangrado o el íleo adinámico, la fuga anastomótica antes de la aparición de signos o síntomas, así como redes neuronales artificiales para predecir el pronóstico, mortalidad, supervivencia y recurrencia en pacientes con CCR. Sistemas que en base al análisis genético podrían seleccionar candidatos a quimioterapia adyuvante o predecir la respuesta al tratamiento oncológico. Otras áreas de aplicación son el seguimiento telemático tras el alta, la evaluación de la experiencia y resultados percibidos por los pacientes, o la investigación. También se han desarrollado modelos de IA para identificar los factores que influyen en el éxito de la reparación inicial de la lesión iatrogénica de la vía biliar, así como para crear un sistema de puntuación de riesgo⁶¹.

En general, las herramientas de la IA desarrolladas para el ámbito preoperatorio pretenden ayudar a los cirujanos a identificar a los candidatos más apropiados y valorar los posibles resultados y complicaciones postoperatorias. Esto puede influir de forma directa en el proceso de información previo a la cirugía en base a la individualización de cada paciente. Todos estos recursos de la IA en cuanto al apoyo en la toma de decisiones, ayudan a reducir los errores médicos y los costes, mejorando el rendimiento del sistema sanitario.

Las aplicaciones clínicas de la IA surgen del objetivo de la asistencia para mejorar la atención al paciente, sin sustituir al cirujano. Hay factores que no se pueden tener en cuenta, como la habilidad del cirujano, por lo que la decisión final debe tomarse basada en la evidencia, criterio y conocimiento del mismo, y no en las probabilidades de los modelos de IA; ya que el desarrollo de estos scores de riesgo en función de las características del paciente tiene como fin ayudar a generar un plan de tratamiento.

Los sistemas de asistencia contextual están basados en el procesamiento de los pasos determinantes de una cirugía para su reconocimiento mediante el aprendizaje automático, esto puede ayudar a la detección de una desviación de la normalidad o estimar la duración de la

cirugía para optimizar el tiempo quirúrgico. Otra posibilidad es la visión informática para la detección de estructuras de riesgo. Durante el procedimiento quirúrgico los cirujanos deben interpretar múltiples datos, y de manera simultánea, especialmente de forma visual y táctil, y actuar en función de la información recibida y de la respuesta fisiológica del paciente.

A nivel intraoperatorio, la IA se puede emplear también para extraer información cuantitativa de un vídeo quirúrgico previo y analizar y recordar la secuencia de los pasos quirúrgicos. Esto puede ser útil en la formación de otros cirujanos. Sin embargo, se ve limitado por la variabilidad anatómica entre los diferentes pacientes, los equipos y la calidad de los mismos, y la falta de homogeneidad en cuanto a las técnicas de disección y el uso de instrumentos. El objetivo es la interpretación de los datos en tiempo real durante la cirugía más allá de las habilidades del cirujano y ayudar a automatizar ciertos procedimientos laboriosos, aumentar la experiencia del cirujano con el análisis de la dinámica quirúrgica y mejorar la formación.

En cuanto a la robótica cognitiva, la IA puede ayudar a la autonomía de los sistemas robóticos. Se debe tener en cuenta que estos sistemas no son capaces de comprender por sí solos el escenario quirúrgico y adaptarse al ritmo de trabajo por lo que sólo serán capaces de realizar ciertas tareas auxiliares sencillas, como el control de la cámara endoscópica, o la realización de una anastomosis, bajo la orden y supervisión del cirujano. Sin embargo, con la IA, los sistemas robóticos cognitivos pueden llegar a integrarse en el entorno e incluso aprender de su propia experiencia mejorando sus resultados con el tiempo. El empleo de la IA en el quirófano no tiene como fin sustituir al cirujano, sino asistir la capacidad humana mediante la mejora de la visión y la destreza para mejorar la seguridad y los resultados quirúrgicos.

En los quirófanos actuales existen múltiples fuentes de información: las imágenes preoperatorias, los dispositivos intraoperatorios como la ecografía o la endoscopia que aportan información sobre la posición del tumor y sirven para la planificación de la cirugía, y monitores de anestesia que ofrecen información sobre el curso de la operación y estado del paciente para actuar en función de ello. La posibilidad de que todos estos dispositivos estén conectados para intercambiar los datos, ayuda a evitar un exceso de los mismos y permitir un

mayor control de la información para disminuir la carga cognitiva en un entorno estresante y complejo como es el quirófano. Esto también influye para para mejorar los resultados en cuanto a seguridad del paciente. OR.NET es un proyecto destinado a integrar los dispositivos del quirófano en una interfaz común, permitiendo una comunicación más eficaz y una mejor dinámica de trabajo⁷³.

En términos generales, la incorporación de la IA en el ámbito quirúrgico se basa en el aprendizaje por la experiencia, esto supone que cuantas más intervenciones quirúrgicas se realicen y por tanto se encuentren mayor variabilidad anatómica y situaciones complejas, se adquiere un mayor conocimiento anatómico y técnico que mejora los resultados de la cirugía. La IA podría mejorar la precisión, seguridad, reproducibilidad y rendimiento en quirófano, lo que supone una reducción del tiempo y los costes.

Para la cirugía asistida por IA es imprescindible la colaboración entre los cirujanos con informáticos e ingenieros. El camino de la IA es prometedor, pero se necesitan más estudios e información sobre su aplicación práctica en cirugía, así como aclaración sobre los aspectos médico-legales y éticos que genera, ya que la tecnología de la IA sigue dependiendo de un análisis humano.

3.4.1. IA en cirugía hepática

Con la era tecnológica la cirugía hepática está viviendo una nueva revolución científica. La IA en este campo promete avances significativos aunque su implementación efectiva sigue siendo compleja. Uno de los principales usos de la IA en la hepatectomía es el empleo en cirugía laparoscópica identificando variantes anatómicas. El conocimiento de la segmentación y de la vascularización hepática mediante las distintas pruebas de imagen previa a la intervención quirúrgica, y su análisis a través de herramientas de IA (radiómica) es fundamental para la localización de la lesión, la identificación de la variabilidad vascular, cálculo de volúmenes y márgenes para la planificación de la resección hepática.

Li et al.⁷⁴ desarrollaron un modelo con redes neuronales convolucionales para analizar imágenes de TC con contraste en pacientes con HCC sometidos a resección curativa, para evaluar la invasión tumoral microvascular, como factor de riesgo de recurrencia y peor

supervivencia. Se basaba en el análisis previo de características morfológicas de TC y RM como el tamaño del tumor, la anatomía arterial, la captación peritumoral, y los márgenes quirúrgicos. Con el desarrollo de la tecnología de reconocimiento de imágenes, la IA puede extraer información subyacente como la invasión microvascular, nerviosa o metástasis linfáticas.

En el caso concreto de la cirugía hepática oncológica, sería útil además un sistema que combine la información del paciente con la evidencia disponible y la experiencia quirúrgica en pacientes similares ya tratados, con el fin de elegir el tratamiento óptimo y evitar el fallo hepático postquirúrgico, o modelos de IA que mejoren los sistemas predictivos en cuanto a tasa de complicaciones y supervivencia. El análisis de variables y características del paciente y del tumor puede ayudar a predecir la complejidad y los resultados postoperatorios de determinados tipos de resección hepática.

En el campo de la cirugía uno de los grandes avances tecnológicos en los últimos tiempos ha sido la cirugía asistida por robot. La robótica y la inteligencia artificial son dos disciplinas diferentes. La principal diferencia es que la robótica se basa en el desarrollo y empleo de dispositivos físicos, y surge de la necesidad de asistir a los humanos en ciertos tipos de tareas. Los avances de la IA han influido a su vez en el progreso y mejora de la robótica, en cuanto al procesamiento de la información, y capacidades sensoriales⁶⁴. Existen sistemas integrados que permiten ver las imágenes radiológicas, ecografías intraoperatorias y reconstrucciones 3D, imagen de fluorescencia molecular, sistemas de simulación virtual y de navegación asistida, para la evaluación de la anatomía biliar y vascular y volumen del remanente hepático. Este tipo de tecnologías han permitido ampliar el alcance de la cirugía hepática y sus indicaciones, evaluando pacientes con grandes tumores considerados inicialmente irresecables⁶⁰.

La tecnología de simulación en 3D consiste en una herramienta que interpreta las características anatómicas y morfológicas de determinadas lesiones, a partir de imágenes radiológicas previas como la ecografía, TC o RM, y a través del análisis de las mismas calcula y describe información como la morfología, tamaño, y distribución espacial del tumor, árbol biliar y vascular, y órganos adyacentes, pudiendo aislar cada uno de los elementos analizados de forma precisa [Figura 10⁷⁵].

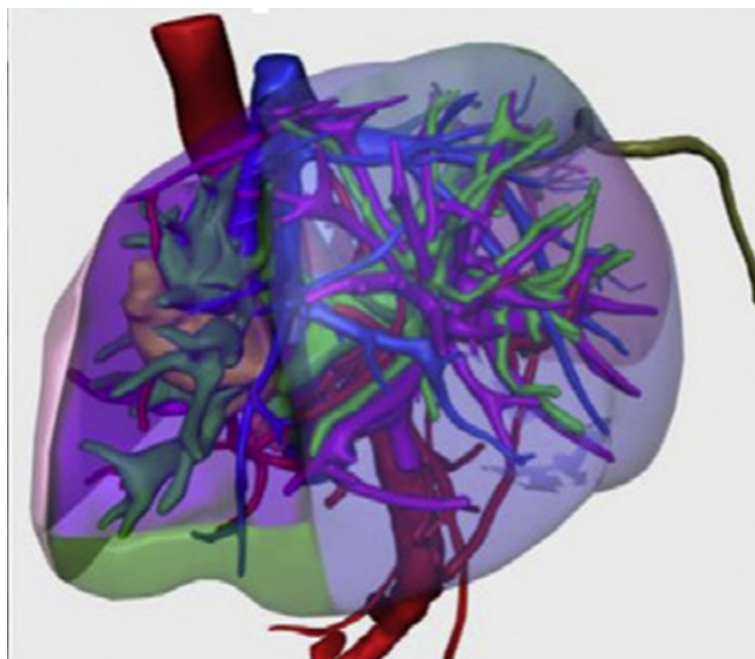


Figura 10⁷⁵. Modelo virtual 3D del hígado en el que se muestra el parénquima hepático, estructuras vasculares, biliares, y una lesión.

Hoy en día es un recurso muy valioso para el estudio preoperatorio y la planificación quirúrgica individualizada, especialmente a nivel de un órgano como el hígado debido a su complejidad anatómica y variabilidad vascular, y en cirugías complejas como por ejemplo aquellas que involucran resección y técnicas de reconstrucción vascular. Con estos modelos se pueden realizar simulaciones virtuales previas a la cirugía para valorar la resecabilidad e identificar las estructuras, la anatomía del hilio hepático, y pasos claves. Esta imagen virtual se puede superponer a la imagen en tiempo real de la superficie hepática del campo quirúrgico. De esta manera se puede ayudar a evitar lesiones iatrogénicas, reducir el sangrado intraoperatorio, isquemia o necrosis del remanente hepático y reducir el tiempo quirúrgico. Además, el empleo de la realidad virtual tiene un gran potencial en la simulación y entrenamiento quirúrgico.

Esta tecnología ya se emplea para las técnicas de ablación por radiofrecuencia, identificación de lesiones mamarias, y la realización de biopsia prostática. En este estudio⁷⁶ se ha desarrollado un novedoso sistema de navegación intraoperatoria para la resección hepática mediante ecografía virtual en tiempo real para la detección de las lesiones, delimitar la extensión de la resección, y la navegación por el plano combinado con la simulación preoperatoria

en 3D. Dado que el sistema utilizaba energía electromagnética en el quirófano, se confirmó su viabilidad y seguridad sin interferencia con otros materiales y aparatos de la sala de quirófano, así como su validez. El sistema pudo utilizarse sin problemas en cada operación, y los 26 tumores programados para resección fueron detectados [Figura 11⁷⁶].

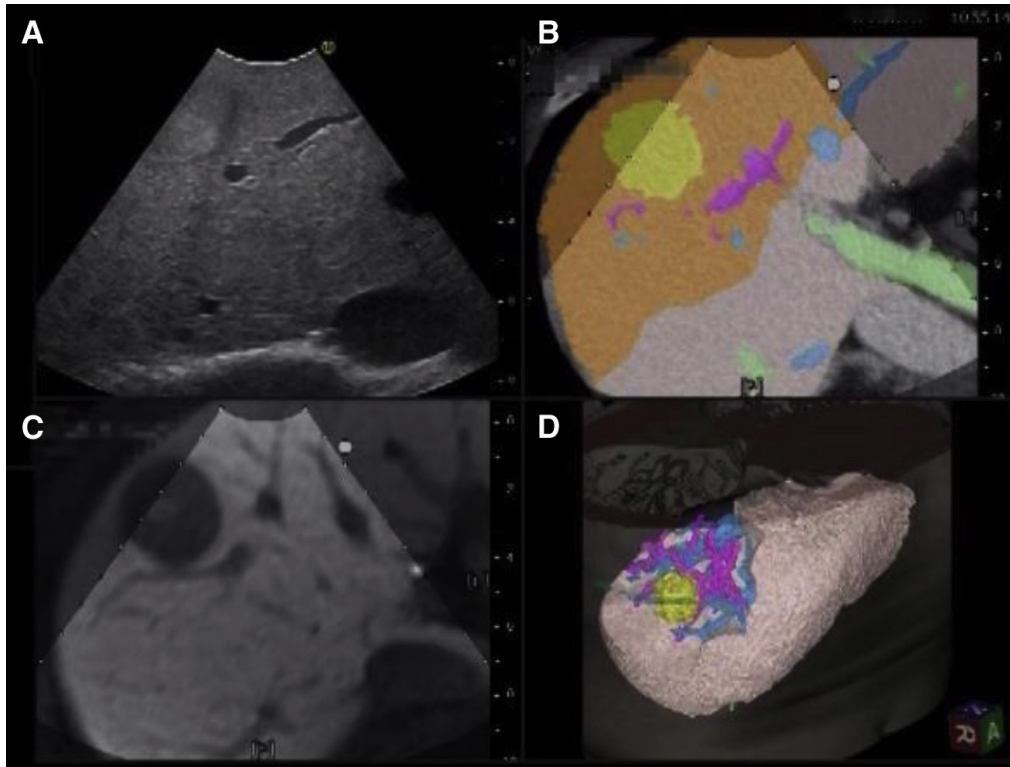


Figura 11⁷⁶. El sistema de navegación muestra en el mismo monitor imágenes de ecografía intraoperatoria (A), imágenes de reconstrucción multiplanar de TC (B) y RM (C) e imágenes tridimensionales del hígado (D), con las distintas estructuras resaltadas en color, así como las estructuras a reseccionar mediante una simulación preoperatoria.

Este tipo de sistemas avanzados integrados se utilizan para la detección intraoperatoria de tumores (siendo más limitado en casos de tumores de pequeño tamaño localizados cerca de la superficie hepática) y la navegación tridimensional por el plano de resección hepática. Si el plano de resección se desplaza hacia el lado del hígado remanente, existe la posibilidad de lesionar la vascularización venosa portal o hepática. Por el contrario, el desplazamiento del plano de resección hacia la lesión puede dar lugar a un margen quirúrgico insuficiente o la exposición del tumor. La línea de demarcación en la superficie hepática puede visualizarse pinzando el pedículo portal o mediante tinción, sin embargo, la línea de demarcación profunda entre el parénquima hepático que se va a reseccionar y el remanente hepático no puede visuali-

zarse con estos métodos tradicionales pero los nuevos sistemas de navegación son capaces de mostrar las estructuras en profundidad.

Además, estos sistemas serían potencialmente útiles para detectar “missing metastases” tras la quimioterapia neoadyuvante, mediante el empleo de las pruebas de imagen previas, ya que incluso estas lesiones que presentan respuesta completa por imagen deberían ser resecadas por la potencial presencia de células cancerígenas viables residuales. También para valorar la invasión vascular, el árbol biliar en caso de patología maligna en combinación con pruebas de RM, colangiografía... Igualmente puede ser útil en casos de tumores múltiples en los que es necesario realizar resección de varias zonas del hígado (cirugías “cherry-picking”) para garantizar un margen quirúrgico suficiente, o casos con lesiones hepáticas difíciles de visualizar con la ecografía pero más fácilmente localizables en las imágenes preoperatorias⁷⁶.

El verde indocianina o inmunocromatografía ICG tiene múltiples usos, se utiliza para determinar el gasto cardiaco, la función hepática, el flujo sanguíneo, y en la angiografía oftálmica⁷¹. El uso de ICG junto a la tecnología de detección de luz infrarroja se emplea para la navegación quirúrgica durante la cirugía hepática desde hace más de 10 años⁷⁷, especialmente para la identificación del tumor, márgenes y delimitación de segmentos. En el campo de la fluorescencia por imagen se han desarrollado nuevas tecnologías que combinan dichas imágenes con las de ultrasonidos, capaces de visualizar tejidos, flujo sanguíneo y metabolismo de oxígeno. Aproximadamente el 30% de las complicaciones quirúrgicas de la cirugía hepática surgen en relación a la inadecuada identificación de las estructuras vasculares y biliares, lo que puede causar sangrado o fuga biliar. En 2023 se desarrolló un nuevo modelo de IA para aportar asistencia virtual al cirujano al reconocer de manera automática y en tiempo real estructuras tubulares (vasculares o biliares) expuestas durante la hepatectomía laparoscópica, a través de una serie de fotogramas de vídeos de cirugías previas estudiadas para realizar una base de datos de entrenamiento para un modelo de aprendizaje profundo, con buenos resultados en cuanto a precisión y sensibilidad [Figura 12⁷⁷]. En el futuro, se podrá emplear la IA para el reconocimiento de estructuras específicas, mediante el entrenamiento de la anatomía a través de equipos de ecografía con sistema GPS o similares.

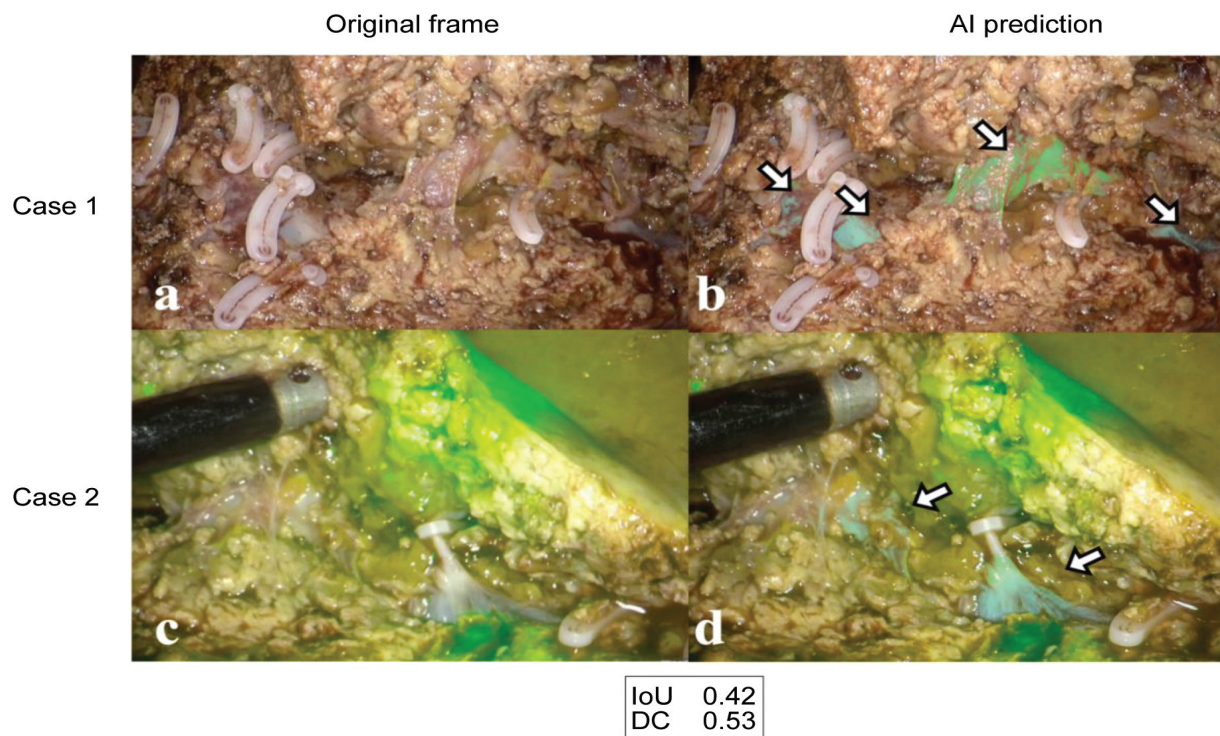


Figura 12⁷⁷. Resultados de la predicción del sistema de IA. (a, c) Estructura original de los casos 1 y 2. (b, d) Predicción por el modelo de IA. (Flecha blanca: estructura tubular).

En el rama del trasplante hepático, los modelos de aprendizaje automático se han empleado para la predicción de los resultados y la supervivencia. Un escenario de actuación interesante es el manejo de la lista de espera, en cuanto a la estimación del riesgo de mortalidad. La clasificación MELD (Model for End-stage Liver Diseases) se desarrolló como un modelo predictivo de mortalidad de los pacientes candidatos a trasplante hepático para priorizarlos en la lista de espera según su puntuación, siendo de gran utilidad en aquellos países con baja tasa de donantes, en los que dicha mortalidad alcanza un porcentaje de hasta el 15-20%. En los últimos años, las características epidemiológicas y limitaciones de los pacientes candidatos a trasplante hepático han evolucionado, lo que ha supuesto una pérdida de precisión de este sistema. La IA ha demostrado potencial en este complejo proceso del trasplante hepático y aumentar la eficacia de los modelos estadísticos clásicos para la predicción de la mortalidad en la lista de espera⁶⁴.

3.5. ÉTICA Y PERSPECTIVAS FUTURAS

La IA se ha consolidado como una herramienta clave en el sector médico y quirúrgico. Sin embargo, es necesario plantearse una serie de cuestiones para estandarizar su uso en la práctica clínica diaria. Además de ayudar en el diagnóstico y tratamiento de la enfermedad hepática, la IA tiene un papel fundamental en la investigación. Con la IA se podrían abordar temas como predecir la distribución futura de las enfermedades hepáticas, desarrollar soluciones coste-efectivas para el diagnóstico y mejorar el proceso de toma de decisiones⁶⁴.

Para crear sistemas de IA seguros y eficaces en estos campos existen aún algunas dificultades. En primer lugar, la recopilación, digitalización e intercambio de datos a gran escala (“big data”). Estos datos como los parámetros analíticos, pruebas de imagen, datos genéticos o metabólicos, pertenecen a varias fuentes. Con una gran variabilidad de datos y de su calidad, los sistemas de aprendizaje automático y aprendizaje profundo pueden desarrollarse y realizar múltiples análisis, cuyos resultados puedan ser trasladados a la práctica clínica y de forma individualizada para cada paciente. Es necesario además sistematizar y estandarizar esta recogida de datos para el buen funcionamiento de los modelos de IA. Cuando se emplean datos retrospectivos pueden verse afectados por sesgos de selección, y los modelos de aprendizaje automático pueden potenciar este sesgo si se emplea poca cantidad de datos y son poco representativos. Se necesitan por tanto gran cantidad de datos que incluyan variedad, minorías y poblaciones menos representativas, y que provengan de diferentes centros clínicos y de investigación.

Sin embargo, en contra de esta idea, la legislación sobre la divulgación y protección de datos cada vez prioriza más la protección de la privacidad, especialmente en Europa tras la aprobación del GDPR (Reglamento General de Protección de Datos) en abril de 2016 y aplicable a partir de mayo de 2018.

Un enfoque para abordar este problema es el aprendizaje federado, un nuevo método de intercambio de datos, o el aprendizaje en enjambre. Son sistemas de aprendizaje automático que permiten el desarrollo de un modelo a partir de un gran conjunto de datos sin la necesidad de compartirlos, y por tanto preservando su privacidad y seguridad. Estos sistemas requieren la colaboración de múltiples centros que compartan sus datos, modelos, y recursos informáticos con un servidor central⁶⁴.

Otro aspecto que se debe tener en cuenta es que, en la actualidad, la mayoría de las herramientas de la IA están diseñadas para realizar una única tarea específica. Se debe desarrollar en el futuro un software integrado que incluya un conjunto de programas, aplicaciones y algoritmos, al igual que ocurre en la práctica médica y la toma de decisiones clínicas, que por lo general recurre a varias fuentes de información. Esto además puede ayudar a reducir el coste, utilización de diferentes formatos de datos y facilitar su conocimiento y uso por todo el personal sanitario. Esto sería especialmente aplicable en el campo de la cirugía, en el que el estudio y manejo es complejo, el diagnóstico diferencial suele ser amplio y se emplean gran cantidad de recursos médicos

Existen múltiples herramientas de la IA aprobadas por la FDA (Food and Drug Administration) para su uso en Estados Unidos y por otros organismos en todo el mundo⁷⁸, sin embargo, es notable la discordancia entre el número de investigaciones emergentes sobre estas aplicaciones y el limitado número de ellas clínicamente aprobadas y disponibles. Esto se debe a una falta de validación externa y estudios prospectivos, falta de infraestructura tecnológica y recursos sanitarios, falta de conocimiento y confianza en los sistemas de aprendizaje automático y profundo entre el personal sanitario, y las cuestiones éticas y legales, especialmente en lo que respecta al tema de la privacidad y manejo de datos.

Es inherente al desarrollo de los sistemas de la IA el debate de cómo pueden afectar a la práctica médica. Por un lado, pueden mejorar su sensibilidad, pero parece disminuir su especificidad⁶⁴. Los modelos de aprendizaje automático y de aprendizaje profundo se han desarrollado hasta poseer la capacidad de obtener resultados, y a partir de ellos realizar conclusiones, pero es necesaria su interpretación por un especialista y que éste sea quien tome la decisión de aplicarlo en la práctica. Los especialistas deben cuestionar y plantearse si utilizan los resultados y predicciones de los modelos de IA en la toma de sus decisiones.

En el presente, la IA forma parte y es un recurso imprescindible en la práctica clínica diaria. Por ello, es necesario preparar y formar al personal sanitario en el conocimiento y empleo de las nuevas tecnologías, y de esta forma potenciar su uso. La implementación de la IA en la práctica médica está aumentando de forma exponencial y es imprescindible tener unos conocimientos básicos para su interpretación y recurrir a los avances que proporciona día a día.

El objetivo principal de la IA es asistir al médico y ayudar a disminuir el riesgo de potenciales errores, pero si el conocimiento para interpretar de forma adecuada sus resultados y límites es insuficiente, su uso puede ser problemático.

En cuanto al marco ético y legal, con el actual desarrollo y autonomía de la IA, una interpretación o resultado inexacto o erróneo puede tener consecuencias relevantes para los pacientes. Deben existir regulaciones y normas para garantizar una aplicación segura de la IA en la práctica clínica y dirigir la responsabilidad. La transformación digital de la asistencia sanitaria requiere que los especialistas consideren las consecuencias de las decisiones sobre la salud de los pacientes, e identificar las situaciones donde la IA puede ser realmente útil.

Por otra parte, se transforma la relación médico-paciente en una dinámica médico-máquina-paciente. Este cambio de paradigma expone la posibilidad de crear un nuevo marco legal que considere la IA como parte de la asistencia médica, en relación a la atribución de la responsabilidad de los hechos, que garantice que si la IA lleva a cabo una decisión incorrecta, debe haber un responsable⁵⁹.

La práctica médica no será reemplazada por la IA en el futuro, ya que la necesidad de actuar en base a datos incompletos, escenarios impredecibles, la capacidad para tomar decisiones complejas y las obligaciones éticas y legales para asumir responsabilidades, está actualmente fuera del alcance de los sistemas de IA.

Para adoptar la IA en la práctica médica habitual, necesita continuar sometiéndose a estudios y ensayos clínicos para confirmar su viabilidad y seguridad, al igual que el resto de prácticas de medicina basada en la evidencia.

II. JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

Actualmente se reconocen ampliamente las ventajas de la cirugía laparoscópica, destacando una menor estancia hospitalaria con mejor calidad de vida, mejor recuperación funcional, y disminución de las complicaciones quirúrgicas. Sin embargo también presenta desventajas. Una de ellas es la restricción de los movimientos, la falta de una adecuada visión espacial con una visión reducida a un campo quirúrgico más limitado, o la falta de sensación táctil.

La cirugía hepática laparoscópica ha experimentado un notable desarrollo en los últimos años, impulsado por una mayor comprensión de la anatomía y función hepática, así como por el avance de las tecnologías médicas. La incorporación de la ecografía intraoperatoria, junto con herramientas innovadoras como los modelos tridimensionales y la realidad virtual, ha contribuido a ampliar sus indicaciones al permitir superar limitaciones técnicas y de recursos que previamente existían. Estos progresos han permitido también una mejora significativa en los resultados en términos de morbilidad y mortalidad.

A pesar de este desarrollo, la dificultad y los resultados de la cirugía hepática laparoscópica están determinados por varios factores, como el tamaño y localización del tumor, número de lesiones, la extensión de la resección hepática, el antecedente de una cirugía hepática previa o la proximidad a estructuras vasculares. No existe aún consenso sobre la importancia de cada uno de estos factores, pero sí se han desarrollado scores para predecir esta dificultad a partir de las variables preoperatorias y realizar una adecuada selección de los pacientes para optimizar los resultados.

En este sentido, la resección laparoscópica de lesiones situadas en los segmentos hepáticos posterosuperiores continúa siendo un desafío por su localización. Se considera uno de los procedimientos más complejos debido a su difícil acceso, visualización limitada por el diafragma y arcos costales, una mayor dificultad en el abordaje de sus pedículos, etc. Esto se traduce en un tiempo quirúrgico y una tasa de conversión mayor comparado con el resto de segmentos hepáticos.

La IA es una rama de la ciencia capaz de analizar información compleja al imitar las funciones cognitivas humanas, como el aprendizaje y la resolución de problemas. En las últimas dos décadas se ha incrementado exponencialmente el interés en la IA, ampliando sus capacidades al campo de la Medicina, especialmente en el campo de la creación de modelos

de predicción y decisión, basados en los algoritmos de aprendizaje profundo y de aprendizaje automático. En concreto, uno de los aspectos críticos de la Cirugía General es la elección del tratamiento ideal para cada paciente y el desarrollo de algoritmos de riesgo personalizados en el ámbito preoperatorio, especialmente en cuanto a la predicción de complicaciones postquirúrgicas, para el apoyo en la toma de decisiones.

Por todo ello, nos planteamos las siguientes hipótesis:

- ¿Puede utilizarse la IA para asistir en la toma de decisiones en la cirugía hepática laparoscópica?
- ¿Puede utilizarse la IA para predecir la complejidad de la cirugía hepática laparoscópica antes de que se realice?
- ¿Puede utilizarse la IA para predecir los resultados de la cirugía hepática laparoscópica antes de que se realice?
- ¿Existen factores que influyen en la posibilidad de conversión a cirugía abierta en este tipo de intervenciones?

Para contrastar las hipótesis anteriores, el objetivo principal de este estudio fue analizar y aplicar modelos de IA que permitan predecir la complejidad y los resultados postoperatorios de la cirugía laparoscópica hepática de los segmentos 7 y 8, en función de determinadas características de cada paciente y de cada lesión, con el fin de facilitar el proceso de toma de decisiones quirúrgicas en las intervenciones de estos segmentos complejos.

El objetivo secundario consistió en identificar los factores que pueden estar relacionados con la conversión a cirugía abierta de este tipo de procedimientos laparoscópicos.

III. MATERIAL Y MÉTODOS

1. DISEÑO DEL ESTUDIO

Se trata de un estudio de cohortes retrospectivo internacional multicéntrico en pacientes sometidos a cirugía hepática mediante abordaje mínimamente invasivo de los segmentos 7 y 8. En este estudio se analizó y desarrolló qué modelo de IA era útil para predecir la complejidad y los resultados postoperatorios de la cirugía hepática laparoscópica de los segmentos 7 y 8, basándose en las características de cada paciente y de cada lesión, para ayudar en la toma de decisiones en la cirugía de estos segmentos complejos. El objetivo secundario fue predecir qué intervenciones iban a precisar conversión a cirugía abierta.

Se probaron diferentes algoritmos de IA y se aplicó en ellos el método SHapley Additive exPlanations, más comúnmente conocido como SHAP, para interpretar y comprender los resultados y razonamiento de los modelos de aprendizaje automático.

2. ÁMBITO DEL ESTUDIO

Este estudio fue llevado a cabo en la Región de Murcia a la que pertenece el Servicio Murciano de Salud. Se llevó a cabo en el área de atención especializada del Área de Salud I (Murcia/Oeste), en la que se encuentra el hospital de referencia, el Hospital Clínico Universitario Virgen de la Arrixaca, que fue el centro coordinador del estudio. El estudio se realizó dentro del servicio de Cirugía General y del Aparato Digestivo en la Unidad de Cirugía Hepatobiliar de alta complejidad de dicho hospital.

Se emplearon las bases de datos de 19 centros internacionales con una experiencia contrastada en cirugía hepática mínimamente invasiva. A continuación se detallan cada uno de los centros participantes:

- Department of General, Visceral and Transplantation Surgery, Clinic and University Hospital Virgen de La Arrixaca, IMIB-ARRIXACA, El Palmar, Murcia, Spain.
- Department of Surgery, Fujita Health University School of Medicine Okazaki Medical Center, Okazaki, Aichi, Japan.
- Department of HPB Surgery and Transplants, Vall d'Hebron University Hospital, Barcelona Autonomic University, Barcelona, Spain.

- Department of Hepatopancreatobiliary and Transplant Surgery, Singapore General Hospital and National Cancer Centre Singapore, Singapore, Singapore.
- Department of Surgery, Fondazione Poliambulanza Istituto Ospedaliero, Brescia, Italy.
- Department of Surgery, Ageo Central General Hospital, Ageo, Japan.
- Liver Surgery Service, Division of Digestive System Surgery, Department of Gastroenterology, Faculty of Medicine, Hospital das Clínicas HCFMUSP, University of São Paulo, São Paulo, Brazil.
- Department of General, Pediatric and Hepatobiliary-Pancreatic Surgery, Kitasato University School of Medicine, Sagamihara, Japan.
- Department of General Surgery, School of Medicine, Clínica Universidad de Navarra, University of Navarra, Pamplona, Spain.
- Department of Surgery, Fukuyama City Hospital, Hiroshima, Japan.
- Department of Surgery, National Cancer Center Hospital East, Kashiwa, Japan.
- Department of Hepato-Biliary-Pancreatic Surgery, Osaka City General Hospital, Osaka, Japan.
- Department of Surgery, Fujita Health University, Toyoake, Japan.
- Department of Surgery, Iwate Medical University, Iwate, Japan.
- General Surgery Unit, Parma University Hospital, Parma, Italy.
- Second Department of Surgery, Wakayama Medical University, 811-1 Kimiidera, Wakayama City, Wakayama, Japan.
- Department of Surgery, Toho University, Tokyo, Japan.
- Department of Hepatobiliary and Pancreatic Surgery, Graduate School of Medicine, Tokyo Medical and Dental University, Tokyo, Japan.
- Department of Hepato-Biliary-Pancreatic and Gastrointestinal Surgery, School of Medicine, International University of Health and Welfare, Chiba, Japan.

3. POBLACIÓN DIANA Y POBLACIÓN DE ESTUDIO

La población diana de este estudio fueron los pacientes sometidos a cirugía mínimamente invasiva de metástasis o tumores primarios, benignos o malignos, localizados en los

segmentos hepáticos 7 y 8. La población objeto de estudio está compuesta por los pacientes sometidos a un abordaje mínimamente invasivo mediante laparoscopia pura, asistida con la mano, o abordaje híbrido, en cada uno de los centros participantes en el estudio.

4. PERIODO DE ESTUDIO

De la base de datos internacional de los 19 centros expertos y mediante estos criterios se recogieron los datos de 585 pacientes, intervenidos entre Enero de 2000 y Diciembre de 2020.

5. CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN

Respecto a los criterios de inclusión establecidos, se analizaron los datos de pacientes intervenidos de metástasis o tumores primarios, benignos o malignos, localizados en los segmentos hepáticos 7 y 8 mediante abordaje:

- Puramente laparoscópico
- Mano asistida
- Híbrido

Acorde con el protocolo de nuestro estudio, se excluyeron los pacientes que requirieron:

- Resección simultánea de otros órganos
- Resección hepática simultánea en segmentos distintos del 7 y 8
- Lesiones metastásicas intraabdominales
- Pacientes menores de 18 años de edad

6. CÁLCULO DEL TAMAÑO MUESTRAL

Al tratarse de un estudio con carácter retrospectivo no se tuvo que realizar cálculo del tamaño muestral ya que se emplearon los datos de los pacientes que cumplieron los criterios para ser recogidos en el estudio.

7. DESCRIPCIÓN DE LA INTERVENCIÓN

El abordaje mínimamente invasivo de la cirugía hepática se ha estandarizado gracias al desarrollo de nuevas técnicas y tecnologías. Las técnicas menos invasivas tienen reconocidos beneficios en cuanto a, por ejemplo, menor dolor postoperatorio, pérdida de sangre, tiempo de estancia hospitalaria y tasas de complicaciones. Estas técnicas incluyen el abordaje laparoscópico puro, el laparoscópico asistido con la mano y el abordaje híbrido.

La cirugía hepática laparoscópica asistida con la mano consiste en la colocación de un puerto que permite la entrada de una mano del cirujano en la cavidad abdominal manteniendo el neumoperitoneo, como recurso para superar alguna de las limitaciones de la laparoscopia pura como la completa libertad de movimientos y la palpación manual para la detección de las lesiones, el control del sangrado mediante la compresión manual y la mejor exposición de los segmentos hepáticos difíciles.

En el abordaje híbrido se emplea la laparoscopia para la movilización del hígado y comenzar la disección, realizando posteriormente una laparotomía (de menor tamaño que en el abordaje abierto) para completar la transección del parénquima.

Todas estas técnicas han demostrado ser seguras y eficaces, aumentando las indicaciones de la cirugía hepática mínimamente invasiva.

8. FINANCIACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Debido a que se utilizaron dispositivos disponibles en la práctica diaria, no se necesitó ninguna financiación extraordinaria para la realización de este estudio.

9. PERSONAL NECESARIO PARA LA INVESTIGACIÓN

En la realización de este trabajo participaron cirujanos y cirujanas de 19 centros internacionales, así como todo el personal sanitario que tomara parte en el trabajo de consulta médica, inclusión en lista de espera, en el propio acto quirúrgico, y en la recogida de datos. También participó en el estudio un grupo de profesionales dedicados al campo de la Estadística

del Departamento de Ingeniería de la Información y las Comunicaciones de la Universidad de Murcia.

10. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

10.1. EXPLICACIÓN DE PARÁMETROS DE ERROR PARA LA EVALUACIÓN DEL MODELO

Cuando se emplea un aprendizaje automático supervisado para crear un modelo de predicción o de regresión, es importante conocer el error que puede tener dicho modelo. Se denomina error a la diferencia que existe entre el valor real u observado y el valor que nuestro modelo ha predicho. Esta diferencia se calcula a través de la distancia euclidiana de ambos valores y existen varias medidas para expresarlo:

- **Error absoluto medio (mean absolute error –MAE–):** expresa la magnitud promedio de los errores de una predicción. Se calcula como la media de los valores absolutos de la diferencia entre las predicciones y los valores observados para conocer el comportamiento del error de todas las observaciones, a través de la siguiente fórmula:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n}$$

- **Error medio cuadrático (mean square error –MSE–):** en lugar de emplear el valor absoluto, la diferencia se eleva al cuadrado para evitar que un error con valor positivo anule a uno con valor negativo. Esta medida es útil para saber la proximidad de la línea de ajuste de nuestra regresión a las observaciones. El resultado se expresa en unidades cuadradas y cuánto más se aproxima el valor a cero es mejor.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}$$

- **Raíz del error medio cuadrático (root mean square error –RMSE–):** se utiliza la raíz cuadrada para poder obtener el valor del error medio cuadrático en unidades originales y facilitar su interpretación.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}}$$

Estas medidas son útiles para evaluar el rendimiento de los modelos de predicción, para comparar diferentes modelos entre sí, o para ajustar los parámetros del modelo con el fin de mejorar la precisión de las predicciones.

Un error absoluto medio o MAE pequeño indica que el modelo está realizando predicciones precisas, al igual que un resultado bajo de la raíz del error medio cuadrático o RMSE; sin embargo, el MAE es útil cuando los errores tienen una distribución simétrica y penaliza igualmente los errores positivos y negativos. El RMSE es más adecuado cuando los errores tienen una distribución asimétrica y penaliza más los errores grandes.

10.2. DESARROLLO DE LOS MODELOS DE IA

La predicción de la complejidad y de los resultados de la cirugía se realizó empleando diferentes modelos de IA.

Para la configuración y selección del mejor modelo, se analizaron los siguientes modelos conocidos de IA: K-Nearest Neighbors (KNN), Multi-layer Perceptron (MLP), Random Forest (RF), Adaboost, Linear Discriminant Analysis (LDA), Support Vector Regression (SVR), ElasticNet y Linear Regressor. Todas las implementaciones utilizadas para estos modelos procedían de la biblioteca Scikit-learn de Python.

Para ambas predicciones (complejidad y resultados) se utilizaron sólo las cirugías que no se convirtieron a cirugía abierta, ya que éstas posteriormente se analizaron por separado. Los datos se dividieron en conjuntos de datos de entrenamiento (70%) y de prueba (30%).

El conjunto de entrenamiento se utilizó como referencia para las transformaciones de las bases de datos, el ajuste de parámetros, la selección del modelo, el entrenamiento del modelo final y la aplicación de SHAP.

SHAP es un enfoque teórico para explicar los resultados de cualquier modelo de IA. Calcula de forma automática en qué medida las variables predictoras contribuyen a la pre-

dicción final y la importancia global de las variables para cada modelo de IA. Los valores de SHAP reflejan la contribución al resultado final de cada variable por separado del conjunto, asegurando al mismo tiempo que la suma de las contribuciones sea igual al resultado final. El objetivo de SHAP es explicar una predicción del modelo calculando la contribución de cada variable a dicha predicción (en nuestro estudio, la complejidad de la cirugía y los resultados postoperatorios); esto se consigue mediante una serie de cálculos promediando cada variable y sus diferentes valores posibles, estableciendo finalmente una importancia o peso a dicha variable de forma global, y no en función de un valor específico de la variable.

Los modelos de IA aprenden durante el entrenamiento a utilizar las variables para predecir la complejidad o los resultados de la cirugía y, mediante SHAP, se interpreta el peso que cada modelo de IA tiene en cuenta para cada variable en la predicción final.

Gracias a SHAP, en una aplicación práctica real de los modelos desarrollados, las contribuciones de las variables nos informan sobre el razonamiento seguido por el modelo de IA a la hora de predecir la complejidad o los resultados de la cirugía.

El conjunto de prueba recibió las mismas transformaciones que el conjunto de entrenamiento, aunque éste último nunca tuvo influencia en ninguna de las transformaciones realizadas en el primero. Por tanto, el conjunto de prueba sólo se empleó en la evaluación final para evitar cualquier sesgo que pudiera comprometer los resultados.

La primera transformación de la base de datos consistió en realizar un proceso de codificación (“One Hot Encoding”) mediante el cual se asignan valores numéricos a las diferentes categorías de una variable, para su aplicación en algoritmos de aprendizaje automático con el fin de facilitar las tareas de predicción. Este tipo de codificación es imprescindible ya que los modelos de IA no pueden utilizar datos categóricos. Esta transformación se llevó a cabo en las variables cualitativas de los conjuntos de entrenamiento y de prueba.

Posteriormente, para imputar los valores perdidos se empleó el modelo de imputación KNN (K-Nearest Neighbor), que es un algoritmo supervisado de aprendizaje automático que consiste en asignar a cada dato perdido en un individuo un valor obtenido a partir de la información disponible de los individuos más cercanos o parecidos a éste. Se entrenó a este

modelo con el conjunto de entrenamiento, y atribuyó los datos perdidos de ambos conjuntos, sustituyendo cada valor perdido por el valor de la cirugía más similar en el conjunto de entrenamiento.

10.3. CONFIGURACIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS MODELOS DE IA

Se realizó una validación cruzada de 10 pliegues (tenfold cross-validation) utilizando el conjunto de entrenamiento para optimizar los modelos de IA y seleccionar el mejor de ellos. La validación cruzada es uno de los métodos de remuestreo de datos más utilizados para evaluar un modelo predictivo. Esta validación consiste en dividir un conjunto de datos en diez subconjuntos de igual tamaño, mediante un muestreo aleatorio sin sustitución, de los cuales nueve se emplean para el entrenamiento del modelo el cual se evalúa en el subconjunto restante, que se mantiene como dato de prueba (denominado conjunto de validación). Este proceso se repite hasta que cada uno de los diez subconjuntos haya servido como conjunto de validación del resto.

Tras la validación cruzada de 10 pliegues y el entrenamiento y evaluación de cada modelo, se seleccionó el modelo y la configuración de cada uno con el mejor rendimiento en MAE para la predicción de la complejidad quirúrgica y los resultados postoperatorios. Por último, se entrenó con todo el conjunto de entrenamiento y se evaluó en el conjunto de prueba, el cual es utilizado por primera vez en este momento. Esta es la metodología tradicional del aprendizaje automático.

Finalmente, para que el modelo sea interpretable, se utilizó el método SHAP, deduciendo la importancia general que el modelo aporta a cada variable, de esta manera, podemos comprender cómo el modelo estima a cada variable de entrada para predecir la complejidad y resultados de la cirugía y la influencia de cada variable en cada una de las predicciones.

La metodología aplicada para la configuración y evaluación de los diferentes modelos de IA se resume en la Figura 13.

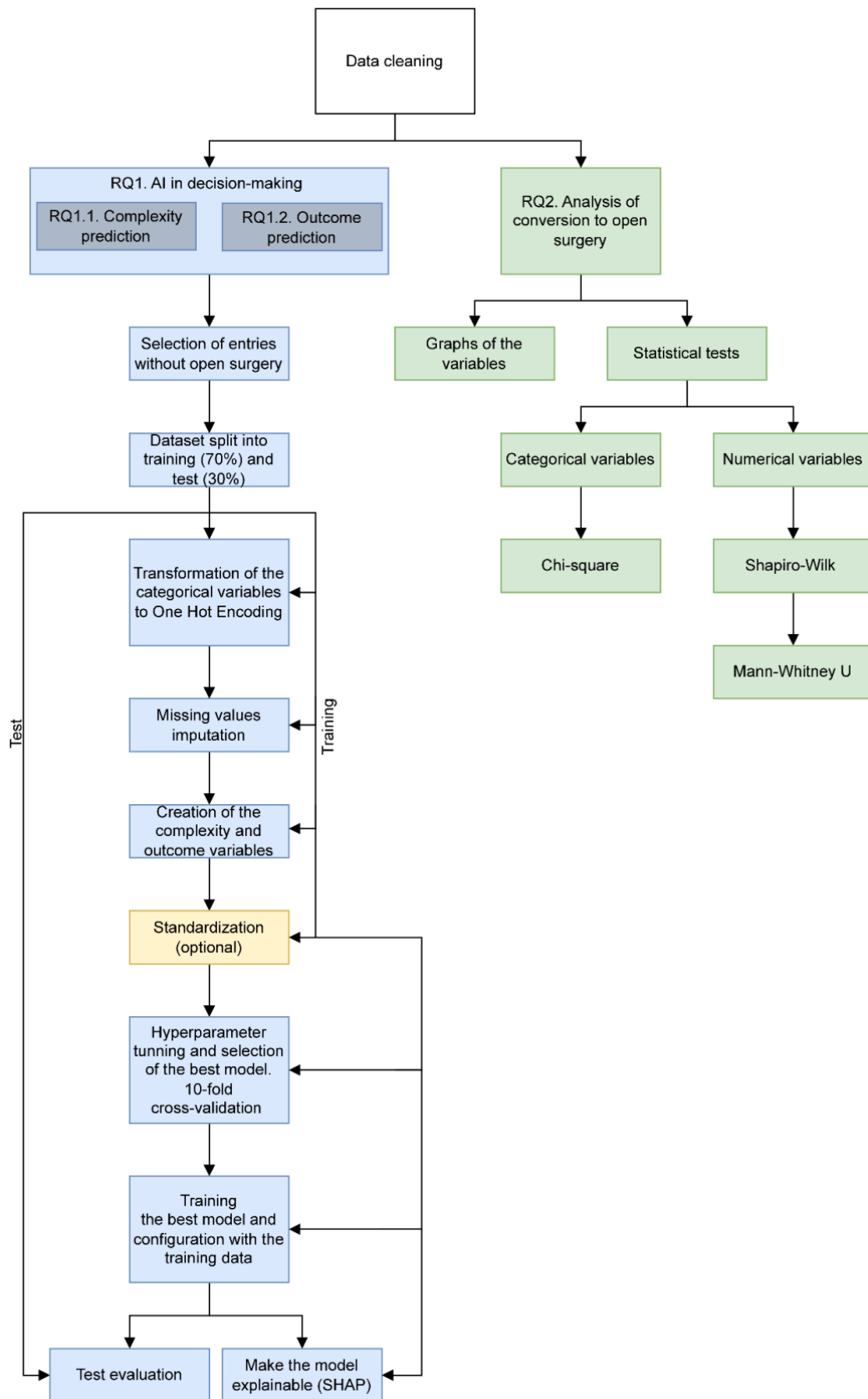


Figura 13. Metodología seguida para la configuración y evaluación de los modelos de IA.

Por último, se creó una aplicación para realizar predicciones utilizando la biblioteca Shapash (<https://shapash.readthedocs.io/en/latest/>) del lenguaje de programación Python. Esta biblioteca genera un panel interactivo que permite la predicción de nuevos casos, así como observar la importancia y contribución de cada variable y visualizar las operaciones del conjunto de entrenamiento [Figura 14].

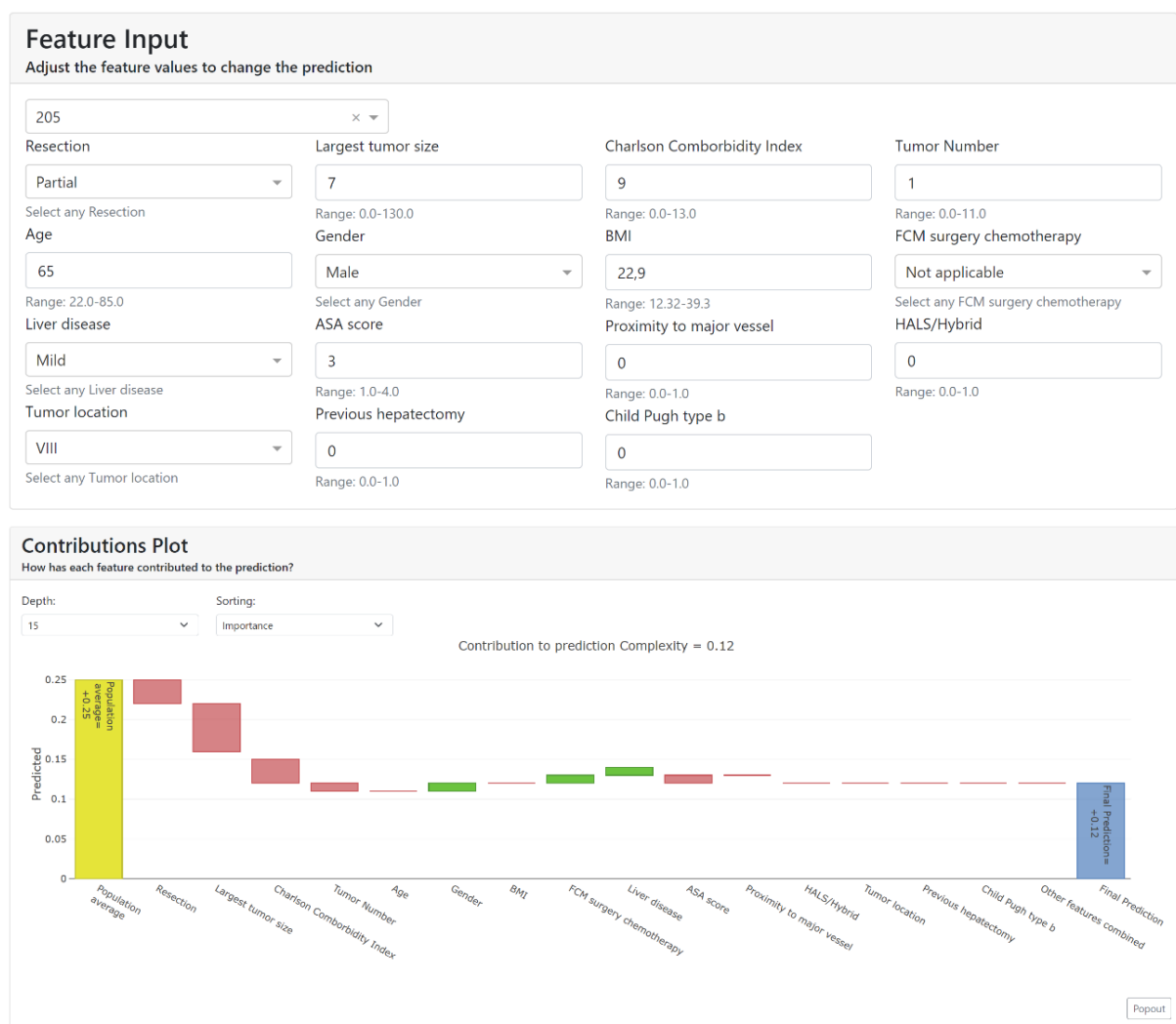


Figura 14. Panel interactivo para la predicción de nuevos casos.

11. VARIABLES DEL ESTUDIO

Se emplearon 22 variables para analizar su relevancia y relación con la complejidad y resultados postoperatorios mediante los modelos de IA desarrollados en el estudio. Las variables incluidas fueron:

11.1. VARIABLES SOCIODEMOGRÁFICAS

- Edad: variable cuantitativa continua, expresada en años.
- Género: variable cualitativa dicotómica (hombre/mujer).
- Valores analíticos: variables cuantitativas continuas. Se recogieron los datos preoperatorios en cuanto a:
 - Creatinina: expresado en mg/dl.
 - Bilirrubina: expresado en mg/dl.
 - Albúmina: expresado en g/dl.
 - Plaquetas: expresado en número de plaquetas/ml.
 - INR
- Escala de riesgo anestésico ASA (American Society of Anesthesiologist): variable cualitativa ordinal. Se trata de un método de valoración del riesgo anestésico en varios niveles:
 - ASA I: paciente sano.
 - ASA II: paciente con enfermedad sistémica leve, controlada y sin limitación funcional.
 - ASA III: paciente con enfermedad sistémica grave con actividad limitada pero no incapacitante.
 - ASA IV: paciente con enfermedad sistémica grave incapacitante, con amenaza continua para la vida.
 - ASA V: paciente con enfermedad terminal o moribundo sin expectativa de vida >24h con o sin intervención quirúrgica.
 - ASA VI: paciente con muerte cerebral.
- Índice de masa corporal (IMC): variable cuantitativa continua. El IMC es el resultado de dividir el peso de una persona en kilogramos entre su estatura elevada al cuadrado expresada en metros. La clasificación de Organización Mundial de la Salud (OMS) según el IMC es la siguiente [Tabla 2]:

Categoría	IMC
Bajo peso	< 18,5
Peso normal	18,5 – 24,9
Sobrepeso	25 – 29,9
Obesidad grado I	30 – 34,9
Obesidad grado II	35 – 39,9
Obesidad grado III	> 40

Tabla 2. Clasificación de la OMS en función del IMC.

- Índice de comorbilidad de Charlson: variable cuantitativa continua. Es un sistema de evaluación para predecir la supervivencia a los 10 años en pacientes con múltiples comorbilidades, en función de éstas (asignando una puntuación determinada a cada una según su relevancia) y la edad. Se expresa en porcentaje. Las comorbilidades que se recogen son:
 - Cardiopatía isquémica
 - Insuficiencia cardiaca congestiva
 - Enfermedad vascular periférica
 - Enfermedad cerebrovascular
 - Demencia
 - Enfermedad pulmonar crónica
 - Enfermedad reumática
 - Úlcera péptica
 - Enfermedad hepática leve, moderada o grave
 - Hipertensión arterial
 - Diabetes mellitus
 - Hemiplejía o paraplejía
 - Enfermedad renal
 - Tumores malignos: tumor sólido, leucemia o linfoma
 - SIDA
- Hepatopatía: variable cualitativa politómica (no/leve/moderada/moderada a severa).
- Hepatectomía previa: variable cualitativa dicotómica (sí/no).

- Quimioterapia neoadyuvante: variable cualitativa politómica (sí/no/no aplicable).
- Child-Pugh: variable cualitativa ordinal. Se trata de una clasificación en tres categorías basada en la puntuación de cinco parámetros (bilirrubina, ascitis, tiempo de protrombina/INR, encefalopatía hepática, y albúmina) [Tabla 3]. Esta clasificación se emplea para evaluar el pronóstico de una enfermedad hepática crónica. Las tres categorías son:
 - Child-Pugh A (puntuación 5-6): enfermedad compensada.
 - Child-Pugh B (puntuación 7-9): compromiso funcional significativo.
 - Child-Pugh C (puntuación 10-15): enfermedad descompensada.

Parámetros	1	2	3
Bilirrubina (mg/dl)	< 2	2 – 3	> 3
Ascitis	Ausente	Leve	Refractaria
Tiempo de protrombina	< 4	4 – 6	> 6
Encefalopatía hepática	Ausente	Grado I-II	Grado III-I
Albúmina (g/dl)	> 3,5	2,8 – 3,5	< 2,8

Tabla 3. Parámetros y valores empleados para la clasificación Child-Pugh.

11.2. VARIABLES RELACIONADAS CON LA LESIÓN

- Indicación quirúrgica: variable cualitativa politómica (MHCCR/HCC/colangiocarcinoma intrahepático/otros).
- Localización del tumor: variable cualitativa politómica (7/8/7+8). Se recoge la localización del tumor en los segmentos 7 y/u 8. Si la lesión se localizaba mayoritariamente en el segmento 7 se categorizó para el análisis como localizada en el segmento 7. Por otro lado, si la lesión se localizaba mayoritariamente en el segmento 8 se categorizó para el análisis como localizada en el segmento 8. En los casos en los que la lesión comprendía completamente ambos segmentos, se incluyó como segmento 7+8.
- Proximidad a estructuras vasculares mayores (vena hepática/pedículo portal): variable cualitativa dicotómica (sí/no).

- Tamaño de la lesión más grande: variable cuantitativa continua, expresada en milímetros.
- Número de lesiones: variable cuantitativa discreta.

11.3. VARIABLES RELACIONADAS CON LA CIRUGÍA

- Tipo de resección: variable cualitativa politómica (resección parcial/segmentectomía/seccionectomía y otras).
- Tipo de abordaje mínimamente invasivo: variable cualitativa politómica (laparoscopia pura/asistida con la mano/abordaje híbrido).
- Pérdida sanguínea intraoperatoria: variable cuantitativa continua, expresada en mililitros.
- Tiempo quirúrgico: variable cuantitativa continua, expresada en minutos.
- Tiempo de maniobra de Pringle: variable cuantitativa continua, expresada en minutos.
- Conversión a cirugía abierta: variable cualitativa dicotómica (sí/no).

11.4. VARIABLES RELACIONADAS CON EL POSTOPERATORIO

- Complicaciones postquirúrgicas: para categorizar las complicaciones postoperatorias se empleó la clasificación de Clavien-Dindo (variable cualitativa ordinal), que determina la gravedad del evento adverso en cinco grados según el tratamiento requerido; y se puntuaron mediante el Índice Integral de Complicaciones (Comprehensive Complication Index). El Índice Integral de Complicaciones expresa la morbilidad en una escala numérica continua de 0 (sin complicaciones) a 100 (exitus) ponderando todas las complicaciones postoperatorias según la clasificación de Clavien-Dindo [Tabla 4].

Grado		Definición
I		Cualquier desviación del postoperatorio normal que no requiera reintervención. Se considera el incluir el uso de soluciones electrolíticas, antieméticos, antipiréticos, analgésicos y fisioterapias. Incluye infección superficial tratada en la cama del paciente.
II		Se requiere tratamiento farmacológico diferente a los anteriores. Uso de transfusiones sanguíneas o de hemoderivados y nutrición parenteral.
III	IIIa	Requiere reintervención quirúrgica endoscópica o radiológica sin anestesia general.
	IIIb	Requiere reintervención quirúrgica endoscópica o radiológica sin anestesia general.
IV		Complicaciones que amenazan la vida del paciente y requieren tratamiento en cuidados intermedios o intensivos.
IVa		Disfunción orgánica única (incluye la diálisis).
IVb		Disfunción orgánica múltiple.
V		Muerte del paciente.

Tabla 4. Clasificación Clavien-Dindo.

- Reingreso a los 90 días: variable cualitativa dicotómica (sí/no).
- Estancia hospitalaria: variable cuantitativa continua, expresada en número de días.

12. RECOGIDA DE DATOS

La cohorte de 585 pacientes del estudio está compuesta por datos procedentes de pacientes intervenidos de lesiones en los segmentos 7 y 8 mediante abordaje laparoscópico. Este estudio recoge casos de diferentes centros internacionales y es coordinado por el Departamento de Cirugía del Hospital Clínico Universitario Virgen de la Arrixaca de la Universidad de Murcia en España.

Para llevar a cabo esta investigación se recogieron variables sociodemográficas, anatomopatológicas, y variables clínicas perioperatorias de los pacientes intervenidos mediante abordaje laparoscópico. Se emplearon informes previos al procedimiento quirúrgico, durante y tras la realización de éste. Así mismo, también se tuvieron en cuenta los informes de reingresos posteriores en el hospital y de las visitas de seguimiento en las sucesivas consultas médicas.

Los datos fueron recogidos por más de 40 investigadores principales procedentes de 19 centros internacionales distintos.

13. CONSIDERACIONES ÉTICAS Y PERMISOS

La realización de este estudio fue aprobada por el comité de revisión institucional del Hospital Clínico Universitario Virgen de la Arrixaca de Murcia, España (código de protocolo interno: 2021-4-8-HCUVA).

14. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para el análisis descriptivo de las variables del estudio se calculó la media con la desviación estándar (DE) o la mediana con el rango intercuartílico (RIC) de las variables cuantitativas, y las frecuencias absolutas (n) y los porcentajes (%) de las variables cualitativas.

Para la realización del análisis estadístico se utilizó un programa estadístico profesional (R project, versión 3.6.1, GLP). Se consideró estadísticamente significativa cualquier asociación en la que el valor de p fuera inferior a 0,05.

Se empleó la prueba de la Chi-cuadrado de Pearson, o la prueba exacta de Fisher cuando la aproximación de la Chi-cuadrado podía ser incorrecta; la prueba de la t de Student para comparar variables continuas; y la prueba de la suma de rangos de Wilcoxon para comparar proporciones.

Para definir la complejidad de la cirugía utilizamos tres variables intraoperatorias que se relacionan con la dificultad de la intervención quirúrgica (pérdida sanguínea, tiempo quirúrgico, y tiempo de Pringle) y otras tres que están relacionadas con los resultados postoperatorios (complicaciones postquirúrgicas, reingreso, y estancia hospitalaria).

Se combinaron las variables relacionadas con la complejidad para crear una nueva variable adicional que resumiera la dificultad de la cirugía (variable “complejidad”), igualmente con las variables relacionadas con los resultados (variable “resultados postoperatorios”), mediante una estandarización que pudiera garantizar la influencia equitativa de cada una de las tres variables iniciales en la variable resumen, independientemente del tamaño de sus valores.

Para describir esta correlación de las nuevas variables agregadas (“complejidad” y “resultados postoperatorios”) y la dependencia de éstas con las variables originales se empleó el coeficiente de correlación de Pearson. Se normalizó el resultado de las nuevas variables en un rango [0, 1] (siendo el valor mínimo 0, y el valor máximo 1), utilizando el conjunto de entrenamiento como referencia y aplicándose al conjunto de entrenamiento y de prueba.

Después, utilizamos el conjunto de datos sin las variables de complejidad y resultados, y predecimos nuestra variable resumen de complejidad y resultados mediante modelos de IA (incluida una búsqueda en cuadrícula para configurar los modelos).

El último paso del preprocesamiento consistió en estandarizar las variables predictoras. Esta normalización es especialmente recomendable para los modelos de IA que emplean pesos o distancias. Sin embargo, consideramos esta estandarización como un paso opcional; así, buscamos la mejor configuración de los modelos de IA en el ajuste de hiperparámetros con y sin aplicar la estandarización.

La variable “complejidad” tenía una correlación de Pearson de 0,67 con “pérdida sanguínea”, 0,54 con “tiempo quirúrgico” y de 0,73 con “tiempo de Pringle”. La variable “resultados postoperatorios” tenía una correlación de Pearson de 0,76 con “complicaciones”, 0,57 con “reingreso” y 0,65 con “estancia hospitalaria”.

Posteriormente se utilizó el conjunto de datos sin las variables de complejidad y resultados y se predijeron estas variables resumen mediante modelos de IA. El último paso del preprocesamiento consistió en estandarizar las variables predictoras (las variables preoperatorias).

Además, se realizó un segundo análisis enfocado a buscar diferencias entre las intervenciones convertidas y las no convertidas a cirugía abierta, con el objetivo de identificar los criterios seguidos por los cirujanos para la conversión y las diferencias en la complejidad y los resultados de la cirugía. Para ello se analizó la distribución de cada variable en función de la conversión a cirugía abierta mediante gráficos, y se aplicaron test estadísticos para encontrar diferencias significativas en cada variable en función de la conversión a cirugía abierta.

Para las variables categóricas, se empleó la prueba de Chi-cuadrado. Para las variables numéricas, se evaluó en primer lugar si las muestras se ajustaban a una distribución normal

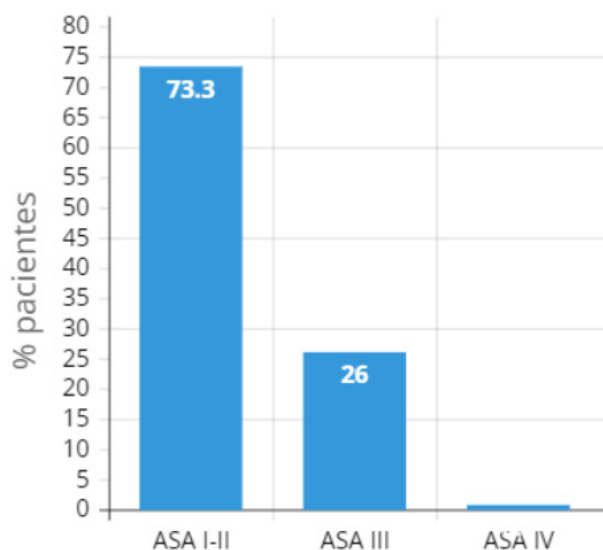
mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Esta prueba indicó que al menos una distribución de cada variable no se ajustaba a una distribución normal, por lo que aplicamos la prueba no paramétrica de la U de Mann-Whitney.

IV. RESULTADOS

1. VARIABLES

1.1. VARIABLES SOCIODEMOGRÁFICAS

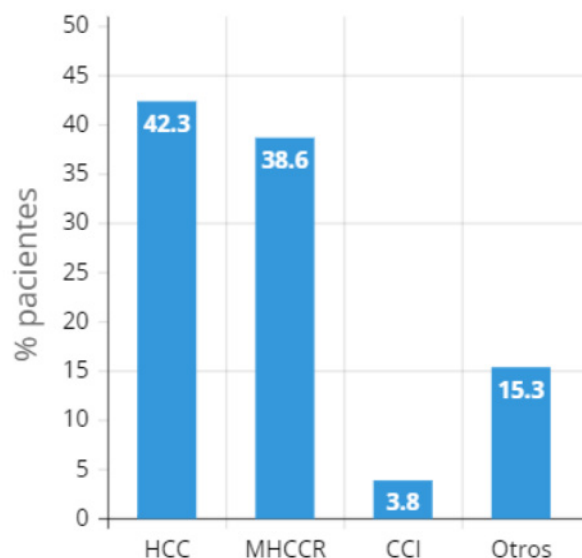
Del total de los pacientes recogidos (n=585), la mediana de edad fue de 67 años [58-74]. Con respecto al género, el 32,7% (n=190) fueron mujeres. La clasificación ASA valora el riesgo anestésico de los pacientes; del total de la muestra, la mayoría, el 73,3% (n=429) se encontraban dentro del grupo ASA I-II, el 26% (n=152) pertenecía al grupo ASA III, y sólo un 0,7% (n=4) presentaban un ASA IV [Gráfica 1].



Gráfica 1. Porcentaje de pacientes según la clasificación ASA.

En cuanto al índice de comorbilidad de Charlson para predecir la supervivencia a los 10 años, la mediana de puntuación en base a la edad y comorbilidades de los pacientes fue de 6 [5-8]. El peso medio fue de 65,8 kilogramos [57-76] con un IMC de 24,3 [21,8-27,4]. La altura media de los pacientes fue de 164 centímetros [159-170].

El HCC fue la indicación quirúrgica más frecuente (42,3%, n=246), seguido de las MHCCR (38,6%, n=225). Aproximadamente la mitad de los pacientes con indicación por MHCCR, un 52,8% (n=117), habían recibido quimioterapia neoadyuvante. La indicación menos frecuente fue el colangiocarcinoma (3,8%, n=22). En un 15,3% de los casos (n=89), la indicación quirúrgica fue por otros motivos [Gráfica 2].



Gráfica 2. Porcentajes de cada indicación quirúrgica.

Se recogieron pacientes con lesiones en los segmentos hepáticos posterosuperiores (7 y 8), en porcentajes iguales; 287 pacientes (49,06%) del total tenían la lesión localizada en el segmento 7 y otros 287 pacientes en el segmento 8. Un pequeño porcentaje de la muestra total, un 1,88% (n=11) tenían lesiones en ambos segmentos.

La media del tamaño de la lesión más grande fue de $30,78 \pm 18,93$ milímetros; y la media del número de lesiones de $1,42 \pm 1,24$.

A nivel preoperatorio se recogieron los valores de creatinina (0,8 mg/dl [0,70-0,96]), bilirrubina (0,69 mg/dl [0,5-0,9]), albúmina (4,2 g/dl [3,9-4,5]), plaquetas (200.700/ml [154.000-266.000]), e INR (1.02 [1-1.09]).

En un tercio de los pacientes (33%, n=182) se registró proximidad de la lesión o lesiones a los grandes vasos, mientras que un 6,3% (n=37) del total de pacientes presentaba una hepatectomía previa.

1.2. VARIABLES INTRAOPERATORIAS Y POSTOPERATORIAS

El abordaje más empleado fue el laparoscópico puro (81,7%, n=478), ya que se recurrió a la laparoscopia asistida con la mano o la técnica híbrida en sólo un 18,3% de los casos (n=107).

En más de la mitad de los casos, un 55,6% (n=325), se realizó una resección local de la lesión, siendo lo siguiente más frecuente la realización de una segmentectomía u otros en un 23,9% de los pacientes (n=139) y una seccionectomía u otros en un porcentaje similar, un 20,5% (n=121).

La mediana de tiempo de la maniobra de Pringle fue de 32 minutos [0-78,5]. La pérdida sanguínea intraoperatoria fue de 185 mililitros [91-400] con un porcentaje de transfusión intraoperatoria del 10,1% de los pacientes (n=59). La mediana de tiempo quirúrgico fue de 278,5 minutos [180-390,5] y la tasa de conversión fue del 6,5% (n=38).

El porcentaje total de complicaciones fue del 27,5% (n=161), siendo Clavien-Dindo $\geq$ IIIa un 6% (n=35), con un CCI promedio de $7,5 \pm 16,5$. Las complicaciones más frecuentes fueron la infección postquirúrgica en un 6,5% (n=38) y las complicaciones pulmonares en un 6,2% (n=36). Otras fueron, un 3,3% (n=19) la ascitis postoperatoria, en un 3,1% (n=18) la fuga biliar, en un 2,2% (n=13) las complicaciones cardiovasculares, un 1,03% (n=6) el fallo hepático, y la menos frecuente el sangrado con un 0,69% (n=4).

La mediana de estancia hospitalaria fue de 6 días [4-10], con una tasa de readmisión a los 90 días del 4,3% (n=25). La mortalidad total fue de 10 pacientes (1,7%).

2. PANEL INTERACTIVO DE PREDICCIÓN

Para reflejar los resultados de los modelos estudiados y demostrar su aplicabilidad en situaciones reales, se creó una aplicación interactiva en la que el cirujano puede introducir los datos específicos de un paciente para calcular las predicciones tanto de la complejidad quirúrgica como de los resultados postoperatorios para ese caso individualizado.

En la Figura 15 se expone un ejemplo. Una vez introducidos los datos, se muestra un gráfico que ofrece la representación visual de la importancia y contribución de cada variable en la predicción final, según el método SHAP, lo que ayuda a comprender el razonamiento seguido por los modelos de IA al tomar esa decisión en particular y cómo ha influido el valor específico de cada variable en la predicción de la complejidad o los resultados de la cirugía. De esta manera el cirujano puede valorar tomar una decisión más sólida en base a las características de cada paciente y lesión.

RESULTADOS

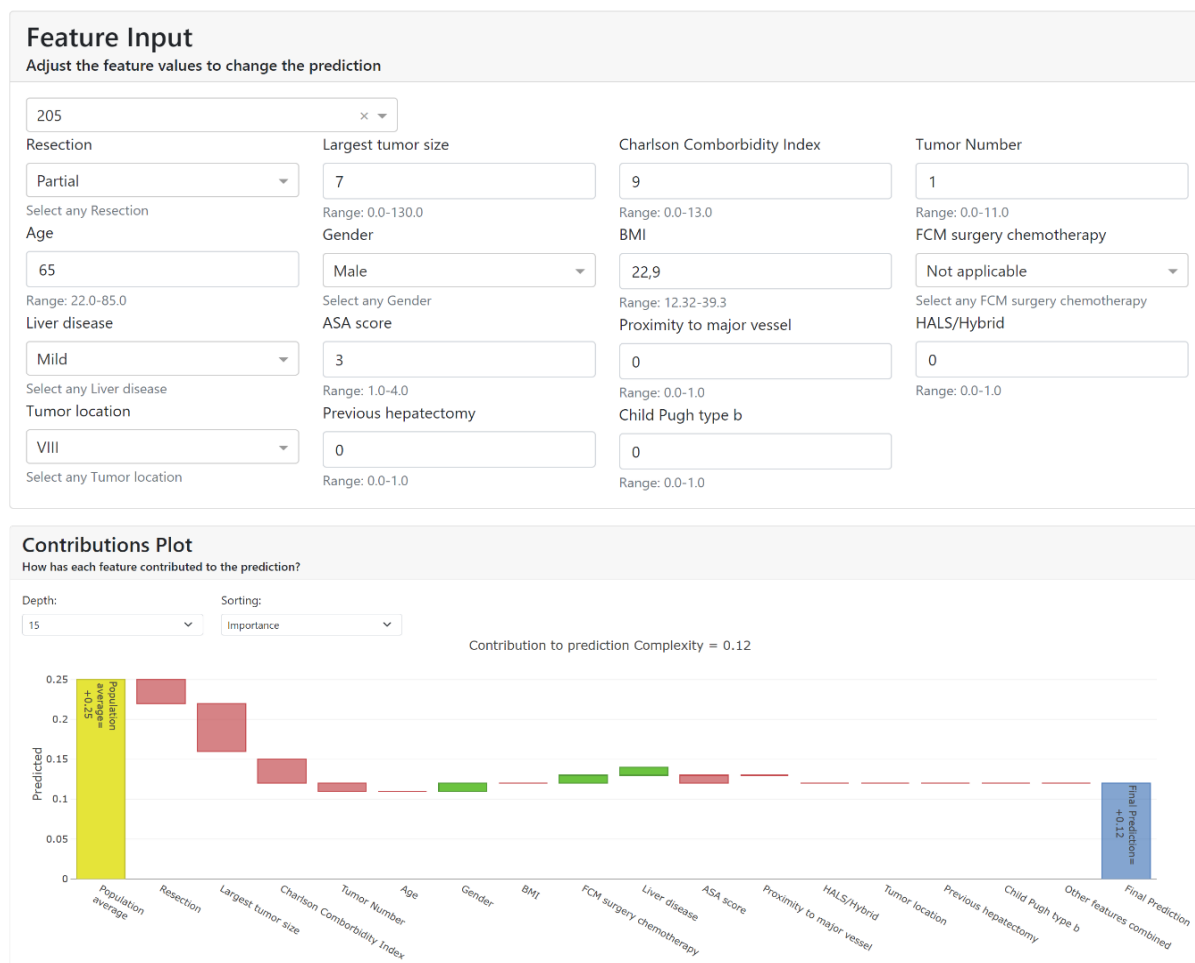


Figura 15. Calculadora de predicción de nuevos casos creada con SHAP.

3. PREDICCIÓN DE LA COMPLEJIDAD DE LA CIRUGÍA

Para realizar la predicción de la complejidad de la cirugía se emplearon y compararon varios modelos. Los resultados de la mejor configuración de cada modelo en el ajuste de hiperparámetros se muestran en la Tabla 5.

Modelo	Base de datos escalada	RMSE	MSE	MAE
MLP	False	0.1394	0.0203	0.1045
Random Forest	False	0.1409	0.0205	0.1048
Random Forest	True	0.1409	0.0205	0.1049
Adaboost	True	0.1423	0.021	0.1071
Adaboost	False	0.1428	0.0211	0.1072
KNN	True	0.1472	0.0222	0.1073
MLP	True	0.1454	0.022	0.1075
SVR	True	0.1436	0.0211	0.109
SVR	False	0.1476	0.0225	0.1096
ElasticNet	False	0.1455	0.0218	0.1099
Tree	True	0.1493	0.023	0.1103
Tree	False	0.1493	0.023	0.1103
ElasticNet	True	0.1478	0.0225	0.1121
Linear regressor	False	0.1491	0.0229	0.1134
Linear regressor	True	0.1491	0.0229	0.1134
KNN	False	0.1538	0.0242	0.1135

Tabla 5. Rendimiento obtenido por la mejor configuración de cada modelo en la validación cruzada de 10 pliegues para predecir la complejidad de la cirugía.

Para esta predicción, el modelo que obtuvo el mejor rendimiento sin escalar la base de datos tras el ajuste de hiperparámetros fue el perceptrón multicapa (multilayer perceptron –MLP–).

Una vez que el modelo MLP fue entrenado con todo el conjunto de entrenamiento sin escalar, se obtuvo un RMSE de 0.1831, un MSE de 0.0335 y un MAE de 0.1132 en el conjunto de prueba. Estos son valores bajos y por tanto se deduce que el rendimiento obtenido en el conjunto de prueba es bueno, permitiendo su aplicación en un escenario real. Sin embargo, el modelo MLP es un modelo de caja negra, y para su aplicación en un escenario médico o quirúrgico real, es esencial comprender el propio modelo así como el razonamiento detrás de sus predicciones. Por ello, se aplicó el método SHAP para facilitar la explicabilidad e interpretabilidad de sus predicciones de cara a su aplicación en una situación real.

Se debe destacar que el modelo MLP obtuvo el mejor rendimiento sin escalar la base de datos. Este resultado es sorprendente porque MLP suele mejorar su rendimiento con los datos escalados, ya que las redes neuronales otorgan diferente peso a cada dato, el cual se va

ajustando posteriormente durante el entrenamiento. Los hiperparámetros que mostraron este mejor rendimiento fueron dos capas con diez neuronas en cada capa, la función de activación logística, el solucionador lbfgs, la parada temprana y 100 interacciones máximas.

Además, observamos que los otros modelos de caja negra (Random Forest y Adaboost), fueron, respectivamente, el segundo y tercer modelo en obtener un mejor rendimiento, comparado con los otros modelos más simples.

La Figura 16 muestra la importancia dada a cada variable en el conjunto global de entrenamiento por el modelo MLP. Esta figura puede aportar a los cirujanos una idea general del comportamiento del modelo de IA. Para este modelo, el tipo de resección es la variable más importante para la predicción de la complejidad de la cirugía, con un valor SHAP de 0.042. Las siguientes variables más relevantes son el tamaño de la lesión más grande y el índice de comorbilidad de Charlson, con un valor SHAP de 0.031 y de 0.021 respectivamente. El resto de variables tienen un valor inferior a la mitad del valor de la variable más importante. La variable Child-Pugh tipo B, es prácticamente ignorada por este modelo.

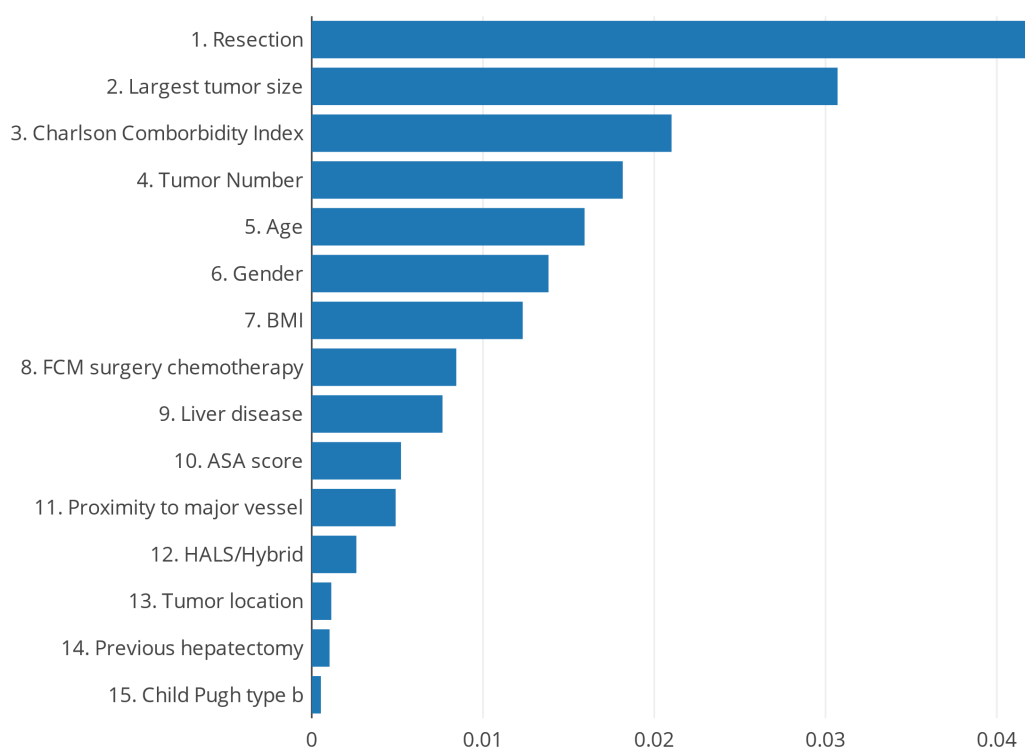


Figura 16. Importancia de cada variable para la predicción de la complejidad de la cirugía mediante el modelo MLP.

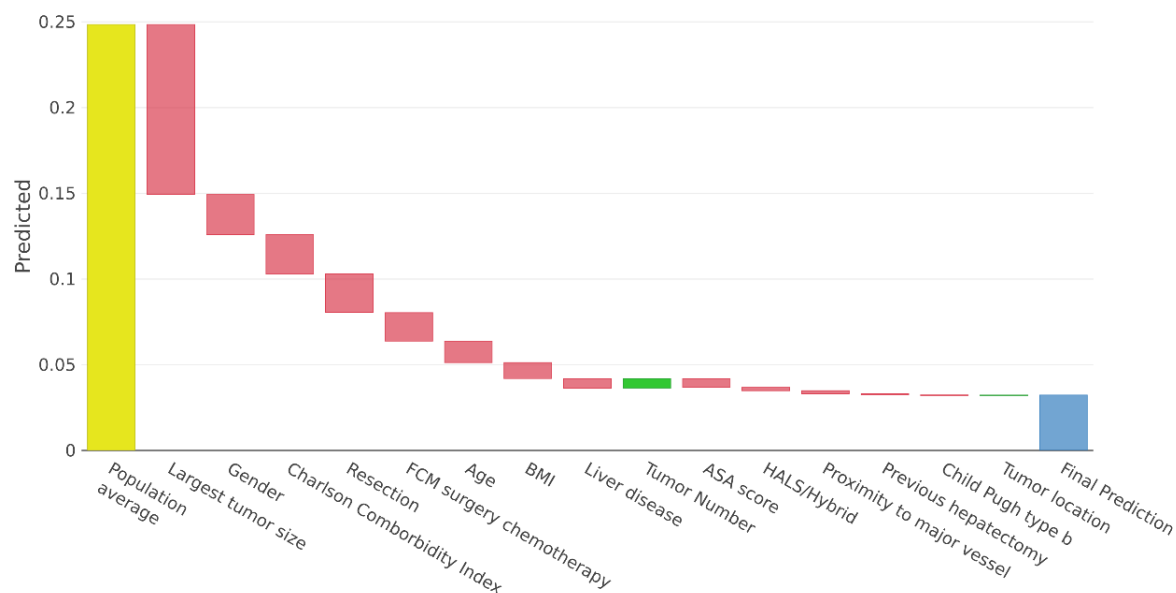
Como parte de nuestro trabajo por último introdujimos el modelo MLP en el panel de predicción interactivo.

Las Figuras 17 (a) y 17 (b) muestran el panel interactivo con la representación de dos casos aleatorios, en el que se observa cómo los datos específicos del paciente y de la lesión influyen en la predicción de la complejidad quirúrgica a través de nuestro modelo y de SHAP. Es decir, podemos representar la contribución de cada una de estas variables según su valor para la predicción final del grado de complejidad quirúrgica que tendrán estos casos individualizados. Esta interfaz está basada en el cálculo creado usando SHAP, lo que permite la predicción de cada caso nuevo.

En estas figuras, la columna “media de la población” indica el valor predicho por defecto por el modelo sin considerar ninguna variable. Tras esta columna, se muestra cómo cada variable aumenta (representada la columna en color verde) o disminuye (columna en color rojo) la predicción final (última columna). Ambas figuras ilustran a los cirujanos el razonamiento seguido por el modelo para predecir dos cirugías.

En el caso representado en la Figura 17 (a) se observa como las variables “tamaño de la lesión más grande” (en este caso, el tamaño es 100 milímetros) y “resección” (en este caso, seccionectomía o mayor) son las que aumentan el valor de la predicción, con un resultado final de +0.4583. Por el contrario, en el caso de la Figura 17 (b) el tamaño de la lesión más grande (2 milímetros) disminuye la predicción final; en este segundo caso la mayoría de las demás variables también contribuyen a disminuir la complejidad, pero en menor medida.

(a)



(b)

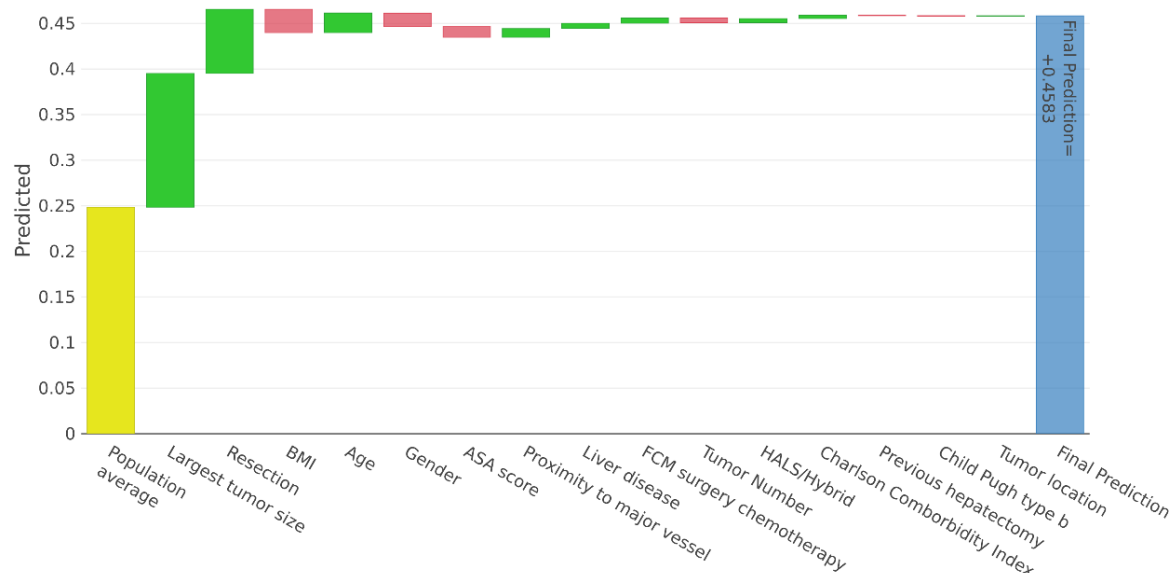


Figura 17. Representación de ejemplos según los valores de cada variable introducida en la calculadora. (a) Predicción de la complejidad de la cirugía: «puntuación ASA 3, «edad»: 76, «IMC»: 33, «Índice de comorbilidad de Charlson»: 6, «Child-Pugh B»: «Falso», «Quimioterapia»: «Sí», «Género»: «femenino», «HALS/Híbrido»: «Falso», «Mayor tamaño del tumor»: «100 100», «Enfermedad hepática»: «Leve», «Hepatectomía previa»: «Falso», «Proximidad a vaso principal»: «Verdadero», «Resección»: «Seccionectomía y más», «Número de tumor»: 1, y «Localización del tumor»: «VII». (b) Predicción de la complejidad de la cirugía: «Puntuación ASA»: 3, «edad»: 61, «IMC»: 29.7, «Índice de comorbilidad de Charlson»: 8, «Child-Pugh B»: «Falso», «Quimioterapia»: «Sí», «Género»: «femenino».

4. PREDICCIÓN DE LOS RESULTADOS POSTOPERATORIOS

El rendimiento de la mejor configuración de cada modelo para predecir los resultados de la cirugía se muestra en la Tabla 6.

Modelo	Base de datos escalada	RMSE	MSE	MAE
Random Forest	False	0.1919	0.0382	0.0998
Random Forest	True	0.1919	0.0382	0.0999
MLP	True	0.1972	0.0403	0.1019
MLP	False	0.1969	0.0401	0.1026
SVR	False	0.1857	0.0355	0.1106
Adaboost	True	0.1843	0.0352	0.1151
Adaboost	False	0.1841	0.0351	0.1152
SVR	True	0.183	0.0346	0.1183
KNN	False	0.1819	0.0344	0.1216
KNN	True	0.1823	0.0345	0.123
ElasticNet	True	0.1829	0.0346	0.1239
ElasticNet	False	0.1819	0.0342	0.1241
Tree	False	0.2085	0.0448	0.1246
Tree	True	0.2085	0.0448	0.1246
Linear regressor	False	0.1862	0.0358	0.1263
Linear regressor	True	0.1862	0.0358	0.1263

Tabla 6. Rendimiento obtenido por la mejor configuración de cada modelo en la validación cruzada de 10 pliegues para predecir los resultados postoperatorios.

En este caso, el mejor resultado se obtuvo con el modelo Random Forest sin escalar los datos, ya que obtuvo el mejor MAE que es la medida de error que consideramos óptima en nuestra metodología, aunque el resto de métricas de error de este modelo no obtuvieron los mejores resultados en relación a los otros.

Se aplicó el conjunto de entrenamiento al modelo Random Forest y sin escalar los datos se obtuvo un RMSE de 0.2568, un MSE de 0.0660 y un MAE de 0.1148 en el conjunto de prueba. El rendimiento obtenido se consideró correcto, es decir, estos datos son aceptables para predecir los resultados postoperatorios en un escenario real.

Al igual que el modelo MLP, el modelo Random Forest es un modelo de caja negra por lo que se aplica SHAP para que sea explicable. De nuevo observamos que estos modelos

de caja negra lograron rendimientos superiores a los otros modelos menos complejos y más interpretables.

La Figura 18 muestra la importancia otorgada por el modelo Random Forest a cada variable en el conjunto global de entrenamiento. Se observa que, para la predicción de los resultados de la cirugía, el tipo de resección y el tamaño de la lesión más grande vuelven a ser las dos variables más importantes con valores SHAP de 0.0073 y 0.0069 respectivamente. La edad es la tercera variable que más relevancia tiene con un valor SHAP de 0.004. Al igual que en el modelo para la predicción de la complejidad, el resto de variables tienen una contribución inferior a la mitad del valor de la variable más importante.

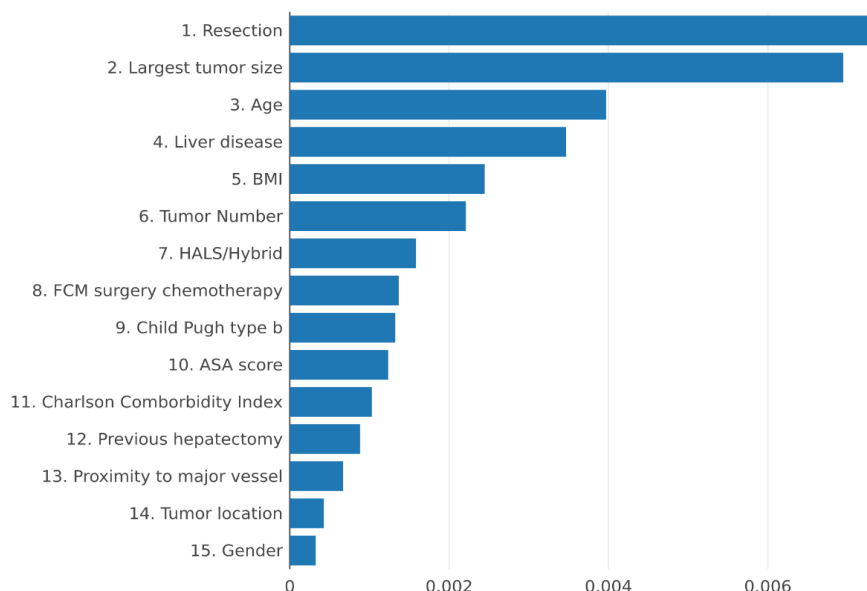


Figura 18. Importancia de cada variable para la predicción de los resultados de la cirugía mediante el modelo Random Forest.

En las Figuras 19 (a) y 19 (b) se muestran de nuevo dos ejemplos para la predicción de los resultados postoperatorios con la interfaz interactiva, mediante la introducción de los datos específicos de cada paciente y lesión en nuestro modelo y con la aplicación de SHAP. Se observa el peso de cada uno de estos datos individualizados para la predicción final. En ambos casos, se objetiva cómo son muchas las variables que contribuyen a la predicción final, tanto su aumento como su disminución respectivamente, y no una única variable.

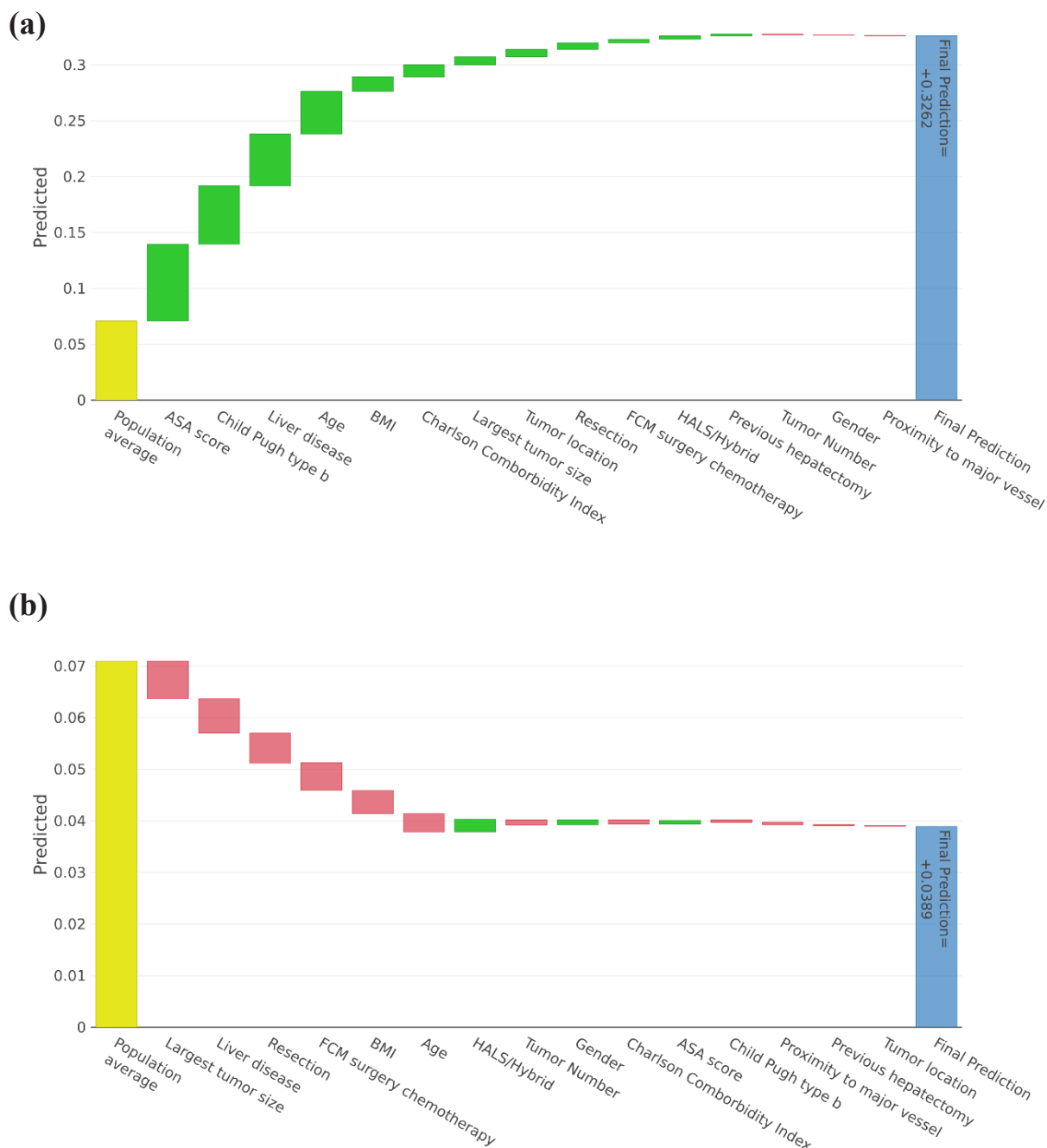


Figura 19. Representación de ejemplos según los valores de cada variable introducida en la calculadora. (a) Predicción de los resultados de la cirugía: «puntuación ASA»: 4, «edad»: 48, «IMC»: 23.53, «Índice de comorbilidad de Charlson»: 5, «Child-Pugh B»: «Verdadero». «género»: «masculino», «HALS/Híbrido»: «Falso», «Mayor tamaño del tumor»: 30, «Enfermedad hepática»: «Moderada a grave», «Hepatectomía previa»: «Falso», «Proximidad a vaso principal»: «Falso», «Resección»: «Parcial», «Número de tumor»: 1, y «Localización del tumor»: «VIII». (b) Predicción de los resultados de la cirugía: «Puntuación ASA»: 1, «edad»: 46, «IMC»: 29,33, «Índice de comorbilidad de Charlson»: 6, «Child-Pugh B»: «Falso», «Quimioterapia»: «Sí», «Género»: «femenino», «HALS/Híbrido»: «verdadero», «Mayor tamaño del tumor»: 20, «Enfermedad hepática»: «Ninguna», «Hepatectomía previa»: «Falso», «Proximidad a vaso principal»: «Falso», «Resección»: «Parcial», «Número de tumor»: 1, y «Localización del tumor»: «VII».

5. INTERPRETACIÓN DE LA PREDICCIÓN

En nuestro estudio, al referirnos a la importancia de cada variable tras aplicar SHAP, estamos hablando de un valor representativo o de significación, no de un valor cuantitativo concreto (positivo o negativo). Por ejemplo, si un valor específico de una variable (como una resección parcial) reduce la complejidad de una intervención, y otro valor de esa misma variable (como una segmentectomía) la incrementa, el modelo asigna un nivel de relevancia a esa variable. Esto significa que dicha variable influye en el resultado, independientemente de que el efecto de cada valor de esa variable sea positivo o negativo en la predicción.

Las figuras 17 y 19 exponen la relevancia de las variables en general, sin distinguir si su impacto es positivo o negativo sobre la predicción. Muestran, por tanto, qué factores deberían tener en cuenta los cirujanos al valorar la complejidad o los resultados de la intervención quirúrgica.

Por otro lado, mientras que las figuras anteriores representan la importancia de cada variable teniendo en cuenta todos sus posibles valores, las figuras 3 y 5 del panel interactivo muestran cómo contribuyeron específicamente los valores concretos de las variables en una cirugía determinada. Esta visualización dinámica permite ver, para un caso particular, qué efecto, positivo o negativo, tiene el valor específico que adoptó cada variable sobre la predicción del modelo.

Así, el modelo proporciona una explicación de por qué hizo una determinada predicción, indicando cómo influyeron los valores de cada variable en la estimación de la complejidad o del resultado de esa intervención quirúrgica. Sin embargo, debido a la complejidad de los modelos de IA empleados, el efecto de un valor concreto de una variable depende también de los valores de las demás. Por esta razón, no es posible asignar una contribución fija a cada variable; sí se puede determinar cuánto aumenta o disminuye, es decir, cuánto influye, en la predicción en un caso específico, pero no se puede establecer un valor exacto que cuantifique cuánto determina dicha variable la complejidad o los resultados de ese caso.

6. ANÁLISIS DE CONVERSIÓN A CIRUGÍA ABIERTA

Para el análisis de las diferentes variables categóricas entre las intervenciones convertidas y las no convertidas a cirugía abierta, desarrollamos los gráficos de la Figura 20, que representan la proporción de cada variable en cada uno de estos dos grupos.

Se detectaron diferencias en la distribución de la variable “localización del tumor” en función de la conversión a cirugía abierta, con una mayor proporción de conversión en aquellos pacientes con lesiones en el segmento 7. En cambio, para las lesiones del segmento 8 hubo mayor proporción de cirugías no convertidas, y sin diferencias en el grupo 7+8. También hubo escasa diferencia en las proporciones de conversión a cirugía abierta o no teniendo en cuenta el tipo de resección, según el tipo de abordaje (HALS o híbrido), la proximidad a estructuras vasculares mayores, si presentaba una hepatectomía previa, la presencia de hepatopatía o si había recibido quimioterapia, si se trataba de un Child-Pugh tipo B o sin diferencias en cuanto al género del paciente.

Además, tras la aplicación de la prueba de Chi-cuadrado a las variables cualitativas [Tabla 7] se observó también esta diferencia estadísticamente significativa ($p=0.0434$) en cuanto a la localización del tumor en función de la conversión a la cirugía abierta. En el resto de las variables no se encontraron diferencias.

RESULTADOS

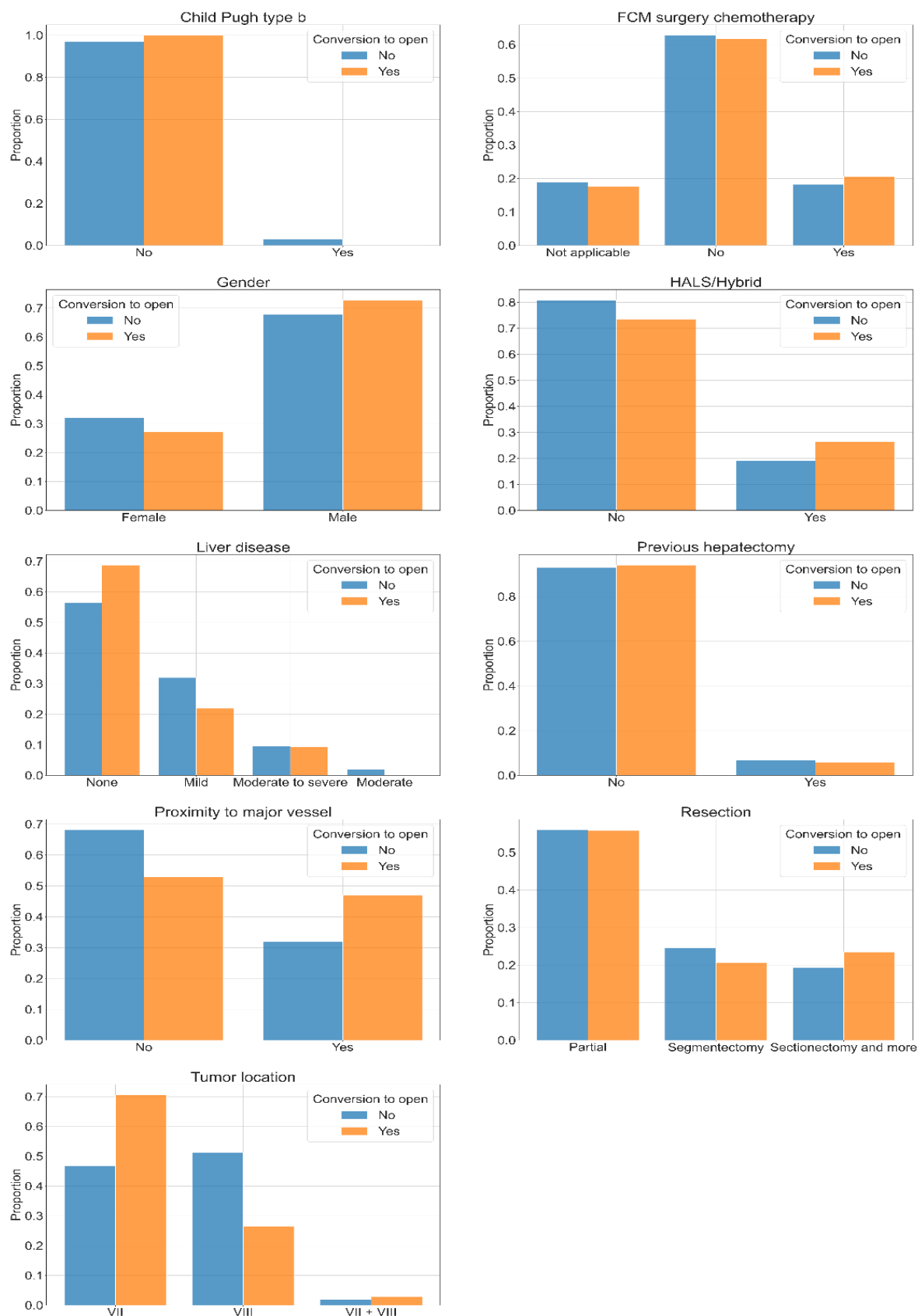


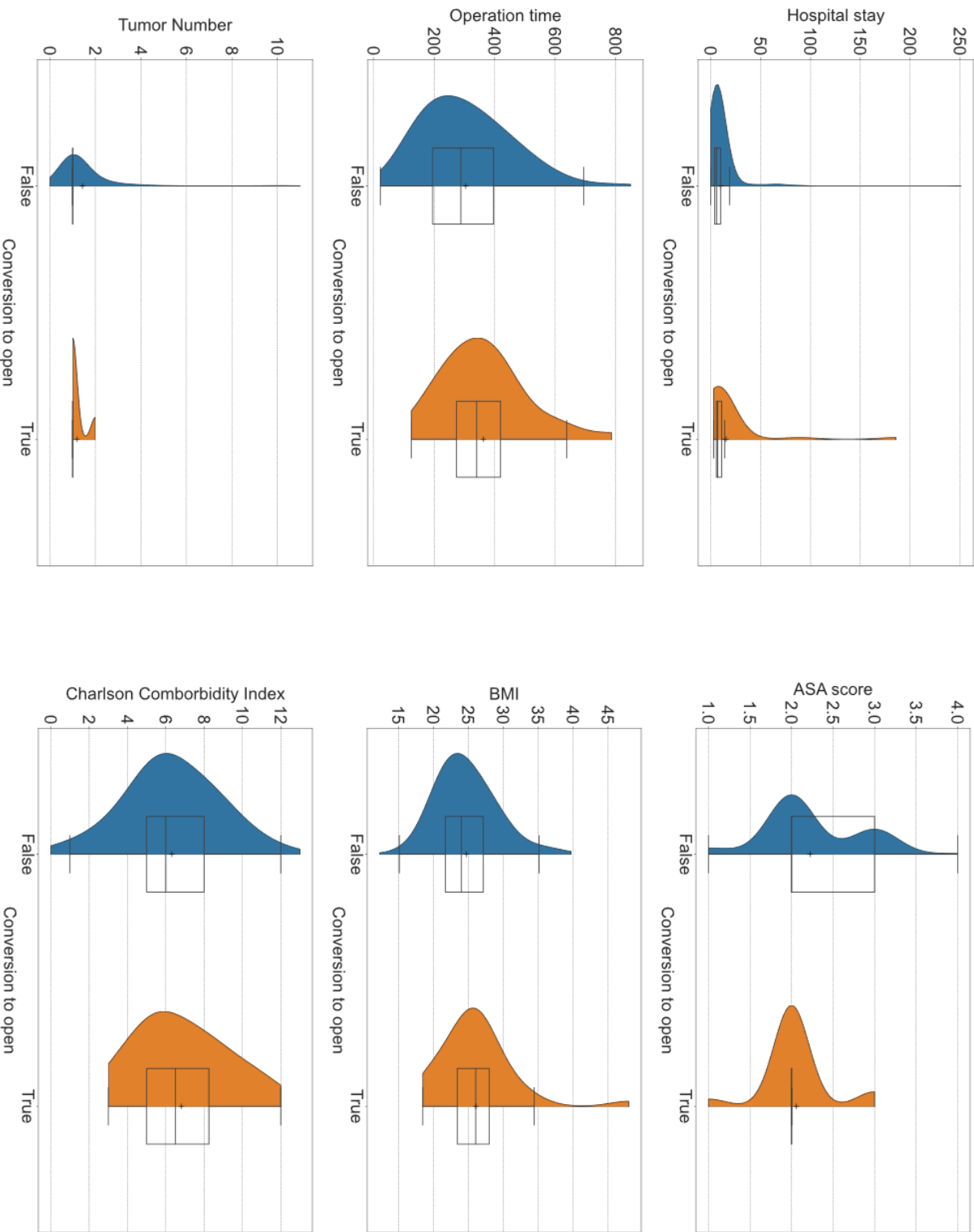
Figura 20. Distribución de cada variable categórica por conversión a cirugía abierta.

Variable	Valor	p-valor
Localización del tumor	8.1308	0.0434
Proximidad a estructura vascular mayor	2.6702	0.1022
HALS/híbrido	0.662	0.4159
Reingreso	0.5866	0.4437
Hepatopatía	2.4298	0.4881
Child Pugh tipo b	0.2701	0.6033
Género	0.1528	0.6959
Resección	0.4968	0.7801
FCM surgery chemotherapy	0.1348	0.9348
Hepatectomía previa	0	1

Tabla 7. Resultados de la prueba Chi-cuadrado para las variables categóricas en función de la conversión a cirugía abierta.

Por otra parte, la distribución de cada variable numérica en función de la conversión a cirugía abierta se muestra a través de los gráficos de cajas y violines incluidos en la Figura 21. Se observan diferencias en las variables “escala de riesgo anestésico ASA”, “pérdida sanguínea”, “complicaciones” y “tiempo quirúrgico”.

El test estadístico que se empleó para el análisis de este tipo de variables fue la U de Mann-Whitney [Tabla 8]. En esta tabla se muestra la media de cada variable en función de la conversión a cirugía abierta, observando que las diferencias observadas en los gráficos para las variables pérdida sanguínea, complicaciones y tiempo quirúrgico son estadísticamente significativas ($p=0.0001$, $p=0.0001$, y $p=0.0132$ respectivamente). Por el contrario, para la variable de la categoría ASA no se encontraron diferencias significativas ($p=0.0807$).



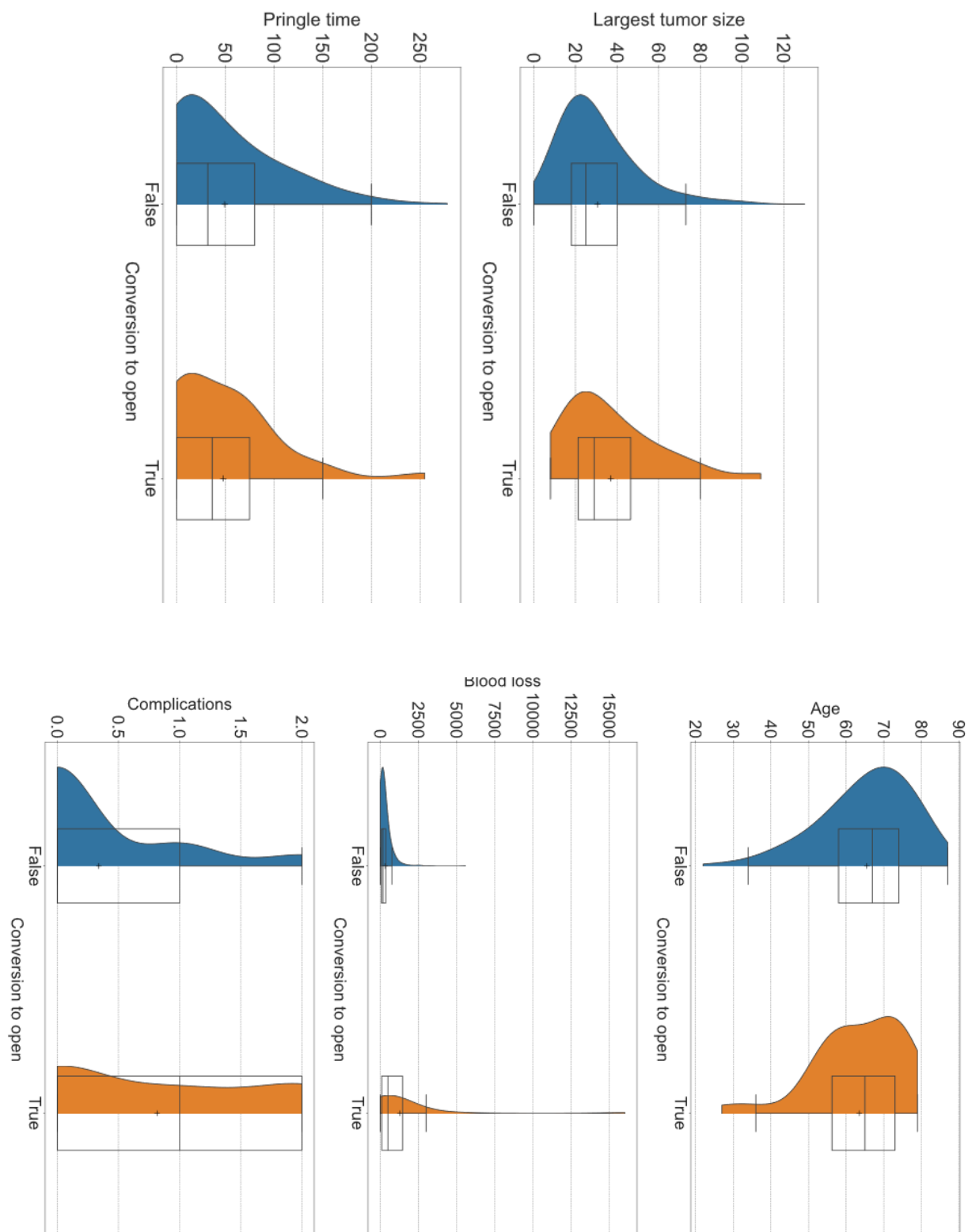


Figura 21. Distribución de cada variable numérica por conversión a cirugía abierta.

RESULTADOS

Variable	Media			U de Mann-Whitney	
	Conversión a cirugía abierta	No conversión	Diferencia	Valor	p-valor
Complicaciones	0.8158	0.3388	0.477	13497.5	0.0001
Pérdida sanguínea	1297.886	303.3081	994.5776	12850.5	0.0001
Tiempo quirúrgico	362.6486	304.7749	57.8737	12466	0.0132
Estancia hospitalaria	15.5	9.7523	5.7477	11579.5	0.0688
ASA score	2.0588	2.2231	-0.1643	7396	0.0807
Tamaño de la lesión más grande	37.0294	30.5457	6.4837	10185	0.0877
IMC	26.0999	24.7073	1.3926	9494.5	0.1128
Edad	63.5	65.501	-2.001	7811.5	0.3248
Índice de Comorbilidad de Charlson	6.8125	6.3157	0.4968	8551.5	0.3972
Número de lesiones	1.1765	1.4303	-0.2538	8260	0.5314
Tiempo de Pringle	47.9211	49.5018	-1.5808	10283.5	0.9886

Tabla 8. Medias y resultados de la prueba U de Mann-Whitney para las variables numéricas en función de la conversión a cirugía abierta.

V. DISCUSIÓN

1. INFLUENCIA DE LA IA EN CIRUGÍA

Actualmente y a nivel mundial, la IA forma parte de nuestra vida en prácticamente todos los ámbitos. En medicina, la IA puede asistir a los facultativos en tareas como la estratificación del riesgo de los pacientes, identificando factores de riesgo, en la detección temprana y tratamiento precoz de posibles complicaciones, ayudando a la optimización del manejo y evitando posibles resultados adversos. El uso de la IA en los sistemas sanitarios es coste-efectivo y esencial, contribuyendo a una asistencia sanitaria asequible y de calidad.

Una de las principales ventajas de la IA es su carácter dinámico, en contraposición con los diagramas en árbol o esquemas de decisión habituales. Por ejemplo, muchas de las herramientas de predicción de riesgo son modelos de regresión estadística, que pueden ser inespecíficos o con falta de precisión a nivel de la individualización de cada paciente. Además, con la IA se puede realizar una reevaluación del riesgo de forma constante, de cara a realizar cambios en la toma de decisiones durante el proceso clínico.

Concretamente en el campo de la cirugía y en relación a todo lo anterior, su objetivo principal consiste en la ayuda de la toma de decisiones para los facultativos en la práctica diaria y ante determinadas situaciones clínicas. Se ha demostrado que la interacción especialista-tecnología aumenta la capacidad de decisión. Por tanto, es importante para los cirujanos tener unos conocimientos fundamentales sobre la IA para entender cómo puede impactar en el sistema sanitario y valorar las situaciones en las que se puede beneficiar de esta tecnología.

Dentro de los sistemas de IA, los más empleados para dicho fin son los modelos de aprendizaje automático. Estos modelos aprenden y realizan predicciones al reconocer patrones en los datos sin una programación previa específica, y demostrando una correlación entre dichos patrones que puede escaparse a los métodos tradicionales, siendo cada vez más aceptados en todo el mundo e integrados en los sistemas sanitarios para la toma de decisiones clínicas basada en la evidencia⁷⁹. Su empleo puede responder a problemas clínicos novedosos o a nuevas hipótesis sobre distintas patologías quirúrgicas y su manejo.

Dentro del aprendizaje automático, los algoritmos de aprendizaje profundo son considerados los principales para manejar y procesar un amplio espectro de datos médicos complejos que incluyen desde variables clínicas preoperatorias a imágenes médicas.

Este apartado de la IA es especialmente útil para identificar patrones en grandes conjuntos de datos, lo que supone una tarea compleja para el análisis humano, mediante el uso de operaciones que permiten realizar asociaciones más complejas e indirectas que un análisis estadístico convencional. Por ejemplo, se ha demostrado la superioridad del aprendizaje automático para la predicción de la infección del sitio quirúrgico con respecto a los modelos de regresión logística, empleando múltiples fuentes de datos como diagnósticos, tratamientos y valores de laboratorio⁸⁰. Igualmente, los algoritmos de aprendizaje automático pueden realizar predicciones con mayor precisión que la estadística convencional.

Por otra parte, existen modelos que ayudan a estratificar el riesgo de los pacientes, con el objetivo de identificar a aquellos de alto riesgo de cara a realizar una actuación determinada para mejorar los resultados y tomar decisiones perioperatorias; en este ámbito se enmarca nuestro estudio, demostrando la utilidad de la IA en cirugía hepática compleja.

Las redes neuronales artificiales son otro recurso del aprendizaje automático que ha adquirido importancia en muchas aplicaciones de la IA. Estas redes procesan información en capas que se van parametrizando a medida que la red neuronal recibe información, y crea mapas de entrada y salida en relación a tareas como el reconocimiento de patrones o imágenes o la clasificación de datos. Las redes de aprendizaje profundo son redes neuronales compuestas por muchas capas y son capaces de aprender patrones más complejos y sutiles que las redes neuronales simples de una o dos capas.

Al igual que otras herramientas de la IA, estas redes neuronales han superado a algunos de los métodos tradicionales de predicción del riesgo, por ejemplo, en cuanto a la predicción de la gravedad de la pancreatitis con respecto al APACHE II en términos de sensibilidad y especificidad, o la predicción de la mortalidad tras la reparación abierta de un aneurisma de aorta abdominal, mediante el empleo de variables clínicas como el los antecedentes personales del paciente, la tensión arterial o la duración de la estancia hospitalaria.

Otras áreas de la IA como el procesamiento del lenguaje natural combinado con algoritmos de aprendizaje automático, se han empleado para predecir la fuga anastomótica en el postoperatorio de cirugía colorrectal, demostrando hasta un 92% de precisión cuanto se analizaban diferentes tipos de datos clínicos de forma conjunta en lugar de individualmente⁸⁰.

La visión artificial o visión computarizada o por computadora es otra rama de la IA que alcanza capacidad a nivel humano en tareas como el reconocimiento de objetos y escenas, a través del conocimiento adquirido a partir de imágenes o vídeos y la identificación de patrones. En el ámbito sanitario esto se aplica a la adquisición e interpretación de imágenes para el diagnóstico, realizar endoscopias virtuales o cirugías guiadas. Mediante esta tecnología se han logrado identificar de forma automática los pasos claves de ciertas intervenciones a través del análisis de vídeos de cirugía laparoscópica, con elevada exactitud, y reconocer gestos quirúrgicos erróneos o inesperados. Este campo aún está en sus inicios, pero demuestra que la IA también puede emplearse para la toma de decisiones intraoperatorias al identificar o predecir eventos adversos en tiempo real. De esta manera, la asistencia automática intraoperatoria puede aumentar la seguridad de la intervención y la estandarización de la cirugía, así como optimizar el flujo de trabajo en quirófano y también tiene un potencial en el ámbito de la formación.

La navegación estereotáctica es un sistema de cirugía asistida que permite a los cirujanos obtener información anatómica en tiempo real gracias a las pruebas de imagen previas. Sin embargo, estos sistemas a veces no son lo suficientemente precisos debido a las deformaciones de los tejidos y los movimientos durante una intervención. La segmentación semántica es un método de visión por ordenador basado en redes neuronales convolucionales que permite reconocer imágenes píxel a píxel. La segmentación semántica trata de comprender específicamente la función de cada píxel de una imagen mediante el proceso de dividir imágenes enteras en agrupaciones de píxeles que puedan etiquetarse y clasificarse. En este campo, por ejemplo, se han desarrollado estudios para la identificación de la pared abdominal o diferentes órganos intraabdominales en la cirugía laparoscópica digestiva, ginecológica y urológica⁸¹, o para el desarrollo de sistemas de navegación intraoperatoria a partir de bases de datos de imágenes de vídeos quirúrgicos, como este estudio experimental⁸² con algoritmos de aprendizaje profundo para el reconocimiento de la arteria mesentérica inferior durante la cirugía de cáncer colorrectal laparoscópica, con el fin de evitar complicaciones intraoperatorias como el sangrado, y ayudar a definir el plano anatómico correcto para realizar una linfadenectomía apropiada.

También se han realizado intentos de utilizar la IA en un ámbito más práctico, aplicándola para la realización de tareas sencillas de forma autónoma y automática (como suturas o

nudos). Incluso, se han desarrollado sistemas robóticos controlados por la IA, como el Smart Tissue Autonomous Robot (STAR) desarrollado por la Universidad Johns Hopkins, capaz de realizar anastomosis intestinales autónomas ex vivo e in vivo en modelos animales con efectividad, evaluando parámetros como la tensión o grosor de la sutura o la deformabilidad del tejido⁸³. Su funcionamiento se basa en un sistema de imágenes plenópticas en 3D y de imágenes de fluorescencia infrarroja junto a un algoritmo de sutura autónoma.

En el campo de la hepatología y la cirugía hepática, la introducción de la IA es reciente, y se basa fundamentalmente en los algoritmos de aprendizaje automático, centrándose en la detección y diagnósticos tempranos, la planificación quirúrgica y la predicción de resultados.

1.1. DETECCIÓN, DIAGNÓSTICO Y PLANIFICACIÓN QUIRÚRGICA EN CIRUGÍA HEPÁTICA

La IA se ha empleado para la detección, diagnóstico y tratamiento de los tumores hepáticos. Varios investigadores han propuesto que la mayoría de las aplicaciones y desarrollo actual de la IA en este campo pueden examinarse desde seis aspectos principales. Estos serían los asistentes virtuales, la terapia adyuvante, el diagnóstico por imagen, la predicción de riesgos y respuesta al tratamiento, la gestión de la rehabilitación postoperatoria y el tratamiento y ensayo de fármacos. El HCC ha sido el principal beneficiado en el área de la hepatología, especialmente debido a que la IA ha sido capaz de revelar características radiológicas, permitiendo su diagnóstico sin necesidad de una confirmación histológica⁸⁴.

A pesar de las múltiples herramientas disponibles para la predicción del riesgo de HCC, ninguna ha sido validada de forma rigurosa ni respaldada por las principales sociedades de hepatología o cirugía hepática. En la actualidad, se recomienda la vigilancia del HCC en pacientes con cirrosis y en pacientes de alto riesgo con infección crónica por virus de la hepatitis B. Disponer de modelos de predicción precisos para el desarrollo de HCC a nivel individual, que empleen factores de riesgo o imágenes más específicas, permitiría a los sistemas sanitarios aplicar estrategias de cribado dirigidas.

Otra área importante en el manejo del HCC es la estratificación del riesgo de recurrencia o de supervivencia. Para ello se han desarrollado algoritmos de aprendizaje profundo

que se basan en imágenes de anatomía patológica, incluso con mayor precisión que algunos scores que combinan datos clínicos, biológicos y patológicos. También se han desarrollado modelos para predecir la recurrencia de HCC tras el trasplante hepático, evaluar la invasión microvascular a partir de imágenes de RM, para diferenciar imágenes histopatológicas de HCC de otros tumores hepáticos o tejido sano, o para predecir el fallo hepático post-hepatectomía⁸⁵.

En el mismo sentido, la detección precoz de pacientes de riesgo de MHCCR a través del análisis radiómico de imágenes de TC, ayudando a la definición de nódulos indeterminados, aumenta la oportunidad de un diagnóstico precoz, una terapia más eficaz y, por tanto, mejores resultados y una optimización de los recursos sanitarios y el tiempo.

En el ámbito de la planificación de la cirugía, la IA se puede aplicar en todas las fases del proceso perioperatorio, con una atención centrada e individualizada en cada paciente. En ocasiones, la ambigüedad sobre el diagnóstico y la respuesta al tratamiento afecta a la toma de decisiones en cuanto a la intervención quirúrgica. En el preoperatorio, con el análisis de los datos clínicos, diagnósticos y pruebas complementarias se podría obtener una puntuación de riesgo más específica del paciente para la planificación operatoria, como realiza nuestro estudio. Durante la intervención, el cirujano puede apoyarse en la IA basándose en herramientas como el análisis en tiempo real de la evolución intraoperatoria que integra los datos del paciente con la imagen quirúrgica, el seguimiento de instrumentos o las manos y el uso de los dispositivos de energía. Esto puede predecir resultados y evitar acontecimientos adversos en tiempo real. Además, la integración de los datos de las diferentes fases operatorias puede ayudar en el manejo postquirúrgico y predecir complicaciones.

La cirugía hepática es un reto fundamentalmente debido a su anatomía, con un sistema vascular complejo, límites imprecisos, y resultados postoperatorios delicados con especial preocupación por la funcionalidad del remanente hepático. Las estructuras anatómicas del hígado son difíciles de reconstruir e identificar durante la intervención quirúrgica debido a la ausencia de límites precisos o planos anatómicos establecidos. Por ello, un tema de investigación relevante es la visualización intraoperatoria de datos de imagen, así como la capacidad de obtener imágenes tridimensionales, y en este sentido la IA ofrece recursos con potencial como la extracción de imágenes, su análisis y adaptación para la navegación intraoperatoria

que facilitan la planificación previa, con la visualización de la imagen en 3D, volumetrías o la realidad aumentada. Por ejemplo, este grupo⁸⁶ desarrolló un modelo de aprendizaje profundo capaz de reconocer con precisión y de forma simultánea ocho tipos de instrumentos quirúrgicos empleados de forma habitual en la cirugía colorrectal laparoscópica. Esto puede aplicarse a innovaciones quirúrgicas como la automatización de movimientos o la navegación intraoperatoria, lo que puede conducir a mejores resultados que se traducen en una menor pérdida sanguínea, estancia hospitalaria, o márgenes de resección adecuados⁸⁷.

La segmentación semántica es un enfoque de la visión computarizada que clasifica y asigna una etiqueta o categoría a cada píxel presente en una imagen, y reconoce los objetos de una imagen como agregados de píxeles, utilizando un algoritmo de aprendizaje profundo supervisado. Esta tecnología se está comenzando a emplear para el reconocimiento automático de estructuras y órganos en la cirugía endoscópica, de cara a su aplicación en sistemas de navegación intraoperatoria. Actualmente se emplean los sistemas de simulación preoperatoria basados en las imágenes radiológicas preoperatorias para la identificación de estructuras. Sin embargo, las modificaciones durante la cirugía, en relación a la posición del paciente, el neumoperitoneo o la movilización del hígado puede llevar a diferencias con dichos modelos, por lo que se están desarrollando sistemas de navegación en tiempo real para el reconocimiento de estructuras.

Otro potencial reto es la superposición de imágenes en el campo quirúrgico, especialmente durante la transección del parénquima hepático, ya que sí existen recursos como el verde de indocianina con eficacia demostrada para la detección de tumores, estructuras biliares y límites vasculares. En este estudio retrospectivo de 2023⁸⁸ se desarrollaron modelos de IA para reconocer las estructuras vasculares hepáticas durante la disección del parénquima en la cirugía de resección hepática laparoscópica, y evaluar su precisión y rendimiento en tiempo real. Para ello se extrajeron y analizaron fragmentos de vídeos de cirugías hepáticas laparoscópicas y se identificaron por separado las venas hepáticas y los pedículos glissoneanos. Estos clips de vídeo se emplearon para entrenar y probar distintos modelos de IA y se desarrollaron modelos de aprendizaje profundo para su reconocimiento, con potencial para la creación de un sistema de navegación automatizado en tiempo real para la cirugía hepática laparoscópica con el fin de evitar la lesión vascular y minimizar el sangrado.

Otros grupos han desarrollado modelos de aprendizaje profundo para la identificación de los pasos quirúrgicos clave de una hepatectomía laparoscópica pura, con el objetivo de realizar una cirugía precisa, segura, eficiente y reproducible. Este grupo⁸⁹ confeccionó una base de datos con 40 casos de resección hepática parcial laparoscópica pura, grabados con los mismos dispositivos y codificados y procesados de la misma manera para obtener imágenes estáticas para así reconocer patrones y sistematizar pasos quirúrgicos. Estos pasos incluyen la inserción de los trócares, la adhesiolisis, la identificación ecográfica de la lesión, marcaje de la línea de resección, la maniobra de Pringle, la movilización del hígado, la transección del parénquima, etc. Para este trabajo, al igual que en el nuestro, se empleó una base de datos de entrenamiento y otra de prueba y se empleó un enfoque de aprendizaje profundo y redes neuronales convolucionales.

Esta identificación automatizada de los pasos de una hepatectomía laparoscópica en tiempo real podría aplicarse a los sistemas de apoyo a la toma de decisiones clínicas, que pueden proporcionar información útil en tiempo real a los cirujanos a lo largo del curso de la cirugía, como datos en cuanto a estructuras o puntos de referencia anatómicos que van apareciendo en el campo quirúrgico, así como aportar información sobre el progreso de la cirugía, guiar en el uso de instrumentos y estimar la duración. Además, puede ayudar a aumentar la seguridad de dichos procedimientos y estandarizarlos. También se han empleado modelos de aprendizaje profundo para la identificación de pasos quirúrgicos de otros procedimientos como la sigmoidectomía laparoscópica, la colecistectomía y la gastrectomía.

1.2. PREDICCIÓN DE RESULTADOS EN CIRUGÍA HEPÁTICA

En términos generales, los resultados de la cirugía hepática han mejorado en la última década con una reducción de la mortalidad postoperatoria de un 20% a menos de un 5%⁸⁴. Este progreso está asociado a avances como la imagen preoperatoria avanzada relacionada con la IA, como la realidad aumentada, así como mejores cuidados perioperatorios y técnicas quirúrgicas. La IA favorece una mejor comprensión de la anatomía, el desarrollo y mejora de las habilidades quirúrgicas, la predicción de los resultados y el manejo de las complicaciones e identificación temprana de las mismas.

Dada la complejidad de la cirugía hepática, ya en la conferencia de consenso de Morioka en 2014, se recomendaba el uso y la implementación de sistemas de puntuación de riesgo, que combinaran todos los factores que influyen en una intervención quirúrgica como son los factores relacionados con el paciente (como el IMC), factores relacionados con el tumor (como el tamaño o la histología) y factores relacionados con la cirugía (como el tipo de resección), con el objetivo de seleccionar adecuadamente a los pacientes⁹⁰.

En el campo de la cirugía hepatobiliar, a día de hoy diferentes grupos han desarrollado con éxito modelos para mejorar el tratamiento perioperatorio de los pacientes con HCC y predecir ciertas situaciones, como las complicaciones o la probabilidad de recidiva. Por ejemplo, para predecir el riesgo de insuficiencia hepática posthepatectomía, se han descrito varios modelos de redes neuronales artificiales para ayudar a los cirujanos a identificar a aquellos pacientes de riesgo⁹¹. También se ha estudiado la predicción de necesidad de ingreso en UCI tras una intervención quirúrgica o la duración de la estancia en UCI, lo que además puede ayudar a la gestión de los recursos y puede ser una medida indirecta de morbilidad⁹².

La selección preoperatoria de los pacientes tiene gran implicación en los árboles de decisión de supervivencia. En este estudio de 2020⁹³ se empleó un modelo de aprendizaje automático denominado CART (Classification and Regression Tree) para identificar los factores pronósticos preoperatorios y postoperatorios más importantes para cada estadio de HCC según la clasificación de Barcelona Clinic Liver Cancer (BCLC). El modelo CART seleccionó la alfa-fetoproteína (AFP) y el índice de comorbilidad de Charlson, como los factores más importantes preoperatorios para la supervivencia total entre los pacientes BCLC-0 y BCLC-A respectivamente, mientras que el análisis radiológico de la carga tumoral fue el mejor predictor de la supervivencia global entre los pacientes BCLC-B. A nivel postoperatorio el modelo mostró que la invasión linfovascular era el mejor predictor de la supervivencia a largo plazo de los pacientes con BCLC-0/A, mientras que la puntuación de la carga tumoral seguía siendo el mejor predictor de los resultados a largo plazo entre los pacientes con BCLC-B en el postoperatorio.

En cuanto al colangiocarcinoma, Tsilimigras et al. en este estudio multicéntrico internacional⁹⁴ desarrollaron un modelo basado en el aprendizaje automático para evaluar de forma

preoperatoria a aquellos individuos que se beneficiarían de la resección quirúrgica evaluando a 1146 pacientes. El modelo identificó ciertos factores pronósticos; los mayores marcadores predictivos vinculados a la supervivencia fueron el tamaño del tumor, los valores de albúmina y bilirrubina, y el estadiaje N preoperatorio. En base a estos factores, el modelo de aprendizaje automático desarrolló cuatro grupos de pacientes para la estratificación del riesgo.

En el caso de la cirugía hepática laparoscópica, la investigación sobre la utilización de la IA es limitada. Ruzzenente et al.⁹⁰ utilizaron un modelo de Random Forest para identificar la importancia de varios scores de puntuación de dificultad ya conocidos (Kawaguchi, Halls, Hasegawa, Iwate) en cuanto a la predicción de los resultados intraoperatorios y a corto plazo. Este estudio es de gran relevancia en el campo de la predicción de resultados postoperatorios, ya que los autores destacan que ninguno de estos scores mostró correlación o significación en la predicción de complicaciones postoperatorias generales y graves. Esto plantea una cuestión en cuanto al verdadero valor de estas escalas, y, especialmente, sobre el papel que pueden desempeñar los nuevos modelos de IA en la mejora de la toma de decisiones en cirugía hepática laparoscópica.

2. APLICABILIDAD DE LOS MODELOS DE IA

Es fundamental utilizar una IA explicable, es decir, modelos que sean entendibles y fiables por y para los profesionales sanitarios. En nuestro caso, esto es necesario para su validez clínica en el ámbito de la cirugía laparoscópica, ya que el proceso de toma de decisiones recae finalmente en el cirujano y por ello es importante que sea conocedor del proceso realizado, especialmente cuando se trata de cirugía hepática laparoscópica compleja.

Una preocupación importante en relación con los algoritmos de la IA es su interpretabilidad. Debido a esto y la complejidad de algunos de sus modelos, es importante y una tarea futura para los especialistas, que se involucren en su desarrollo y se formen para comprender e interpretar sus resultados. Esto, sumado a la cantidad de información y crecimiento exponencial de la misma en el campo sanitario, requiere el desarrollo de nuevos conocimientos, habilidades y actitudes por parte del personal sanitario, así como de los planes de estudio de la formación médica. Muchos de los modelos de IA, como algunos de aprendizaje automático

y de aprendizaje profundo conocidos como modelos de caja negra, emplean algoritmos muy complejos que generan resultados a partir de operaciones “no transparentes” que la mayoría de especialistas puede encontrar difíciles de comprender o incorporar a su práctica clínica. Por ejemplo, la naturaleza de las redes neuronales permite detectar patrones de forma automática que los humanos no son capaces de detectar y, por tanto, es difícil evaluar cómo o por qué se han generado dichos patrones. Para ello los profesionales tienen que aprender a comprender los datos empleados para el entrenamiento del modelo, su funcionamiento y cómo se generan los resultados por los modelos de IA para poder interpretarlos según cada caso y contexto. También de esta manera, el médico puede identificar cuándo el algoritmo o los resultados generados por la IA no son aplicables según cada caso o cuándo puede haber sesgos, y justificar la desviación del protocolo o predicción marcado por la IA⁷⁹.

Otro aspecto esencial sobre la IA en el ámbito sanitario es determinar la responsabilidad de estos modelos, en cuanto a la seguridad, verificabilidad, toma de decisiones e implicaciones de sus análisis en la práctica clínica, que debe recaer sobre el profesional. Esto ha obstaculizado en parte el uso de los algoritmos de la IA en muchos campos, y ha resaltado la necesidad de que los especialistas se formen, se involucren y conozcan la interpretabilidad de los algoritmos de la IA.

En este sentido y para nuestro estudio, la aplicación de SHAP permite analizar los resultados y comprender el comportamiento general de nuestros modelos de IA para predecir la complejidad y los resultados postoperatorios de la cirugía hepática mínimamente invasiva. A través de la aplicación de SHAP, es posible distinguir qué factores son importantes en la predicción realizada por los modelos de IA, conocer la contribución o el peso de cada variable en la predicción final y de esta manera comprender el razonamiento realizado por el modelo en cada caso. En resumen, el uso de SHAP supone un método consolidado para explicar las predicciones del modelo de IA en el contexto quirúrgico, para garantizar la transparencia y asegurar los resultados en la medida de lo posible para permitir su uso en la práctica clínica real de forma más responsable.

3. NUESTROS MODELOS

El modelo de perceptrón multicapa (multilayer perceptron –MLP–) es un modelo de red neuronal artificial que se conforma de varias capas, siendo capaz por tanto de crear algoritmos para una o más variables dependientes basándose en varias variables predictoras. Se trata además de un modelo de caja negra porque es difícil acceder a su procesamiento interno en cuanto al desarrollo del análisis predictivo. Este modelo fue el que obtuvo mejores resultados para predecir la complejidad de la cirugía.

El modelo para la predicción de los resultados con mejor rendimiento fue el Random Forest, que se trata de un algoritmo de aprendizaje automático supervisado que genera árboles de decisión sobre un conjunto de datos de entrenamiento, obteniendo resultados que a su vez se combinan para crear un modelo único más sólido en comparación con los resultados de cada árbol por separado.

En este tipo de modelos, la falta de transparencia en su proceso predictivo puede suponer un problema para su aplicación en un escenario médico real, por ello, como se ha explicado previamente, hemos empleado SHAP para comprender el razonamiento realizado por cada modelo⁹⁵. SHAP utiliza la teoría de juegos (el método de distribución de riquezas ideado por el matemático y economista Lloyd Shapley, ideado para repartir las ganancias de un juego entre todos los jugadores de forma proporcional a la contribución de cada uno de ellos en el juego) para calcular cuánto contribuyen nuestras variables predictoras a la predicción final y la importancia global de las variables para el modelo de IA.

Cuando utilizamos estos modelos para predecir la complejidad y resultados de una resección laparoscópica de los segmentos 7 y 8, las variables que por lo general tienen mayor importancia son el tipo de resección y fundamentalmente aquellas determinadas de forma preoperatoria, como el tamaño tumoral, la edad, el índice de comorbilidad de Charlson, la presencia de hepatopatía o el número de lesiones. Estos hallazgos nos permiten realizar una primera interpretación sobre la importancia de tomar decisiones en cuanto a una adecuada selección de los pacientes en función del tipo de cirugía para obtener los mejores resultados.

Tras la elección de cada modelo y el análisis predictivo, el siguiente paso fue crear una interfaz para realizar una simulación de posibles casos, basándonos en el primer análisis global que habíamos realizado. Esta interfaz nos sirve para representar de forma gráfica ejemplos de casos concretos y sus resultados en función de las características (valor de las variables) de cada uno de ellos. Para una cirugía concreta, cada valor de cada variable tiene un efecto específico (contribución) en la predicción final. Por tanto, el modelo nos está explicando por qué ha tomado esa decisión concreta y cómo ha influido el valor de cada variable en la predicción final de la complejidad o los resultados de la cirugía.

La relevancia e interpretación de los resultados de nuestro estudio nos sirve para tomar decisiones como, por ejemplo, que si un modelo determina que la complejidad de un caso por sus variables va a aumentar hasta un 10%, podemos tener en cuenta qué cirujano va a realizar la cirugía basado en su curva de aprendizaje, o informar a los pacientes de que en función de sus características, el grado de dificultad y el porcentaje de complicaciones puede ser mayor. Esto también permite al paciente y familiares comprender mejor la magnitud de la cirugía.

4. NUESTROS RESULTADOS

Hasta ahora, varios factores se han relacionado con la complejidad y los resultados postoperatorios de la cirugía hepática laparoscópica. En general, la mayoría de autores coinciden en la importancia del tamaño y del número de lesiones, el IMC, la presencia o no de hepatopatía, la indicación quirúrgica, la proximidad a estructuras vasculares, el tipo de resección, la quimioterapia neoadyuvante o el antecedente de una cirugía hepática previa. Sin embargo, no hay consenso sobre aquellos factores que puedan ser más relevantes o la trascendencia específica de cada uno de ellos. Igualmente, hay que destacar la importancia de la localización de la o las lesiones a resecar, ya que los segmentos considerados difíciles o desfavorables (en general, los segmentos 1, 4a, 7 y 8) no presentan la misma dificultad técnica ni resultados, especialmente a la hora de realizar un abordaje mínimamente invasivo. En concreto, los segmentos 7 y 8 son técnicamente más complejos, por ello nuestro grupo se ha centrado exclusivamente en los resultados de estos.

Nuestro modelo es el primer modelo de IA que analiza y predice la complejidad de la intervención quirúrgica y sus resultados en pacientes sometidos a una resección hepática laparoscópica de lesiones localizadas en los segmentos 7 y 8.

4.1. FACTORES RELACIONADOS CON LA COMPLEJIDAD DE LA CIRUGÍA

Según nuestro modelo con mayor rendimiento, el tipo de resección fue la variable más importante para la predicción de la complejidad de la cirugía; las siguientes variables más relevantes fueron el tamaño de la lesión más grande y el índice de comorbilidad de Charlson. En contraposición, la variable Child-Pugh B es prácticamente ignorada por este modelo.

En cuanto al tipo de resección como variable de mayor importancia, este grupo (96) a través de una base de datos de cirugía hepática laparoscópica, dividieron el tipo de resección entres grupos de dificultad basándose en variables intraoperatorias como el tiempo quirúrgico ($< o \geq 190$ minutos), la pérdida sanguínea ($< o \geq 100$ mililitros) y la tasa de conversión ($< o \geq 4,2\%$), ya que consideran que la dificultad quirúrgica puede establecerse a través una combinación de estos factores intraoperatorios. De esta forma, establecieron tres grupos de dificultad, el primero o de menor dificultad incluía la resección en cuña y la seccionectomía lateral izquierda; el segundo grupo o intermedio, la segmentectomía anterolateral y la hepatectomía izquierda; y en el tercer grupo de dificultad alta se englobaban la segmentectomía posterosuperior, la seccionectomía posterior derecha, la hepatectomía derecha, la hepatectomía central, y las hemihepatectomías extendidas. Tanto la morbilidad como la tasa de complicaciones incrementaron significativamente del primer al tercer grupo.

Según esta revisión sistemática⁹⁷ sobre los factores pronósticos y resultados de la cirugía hepática laparoscópica de las MHCCR, la hepatectomía mayor se asocia a mayor pérdida sanguínea, transfusión intraoperatoria, mayor tasa de conversión, tiempo quirúrgico y estancia hospitalaria.

Sin embargo la mayoría de estudios de la literatura evalúan la complejidad o resultados en cuanto a la localización de las lesiones (como comparando las de los segmentos posterosuperiores), más que especificar el tipo de resección como factor predictor. En esa última revisión sistemática se observó que las variaciones en cuanto a las pérdidas hemáticas y el

tiempo quirúrgico fueron mayores en la cirugía de resección laparoscópica de los segmentos posterosuperiores.

En este estudio⁹⁸ que comparó la resección laparoscópica de lesiones de HCC localizadas en los segmentos 1, 4a, 7 y 8, con los segmentos anterolaterales, encontraron diferencias significativas en cuanto al tiempo quirúrgico y la pérdida de sangre, mayores en el primer grupo que en el grupo de los segmentos anterolaterales. Como posibles causas que justificaran estas diferencias refieren la necesidad de realizar una movilización completa del hígado para las lesiones de los segmentos difíciles, así como la necesidad de disecar la vena hepática derecha para exponer las lesiones. Igualmente, más pacientes del primer grupo se sometieron a una hepatectomía mayor, y en este grupo la hemostasia fue más dificultosa.

Este otro estudio⁹⁹ también compara los resultados perioperatorios y a largo plazo entre dos grupos de resección laparoscópica de HCC, en función de la localización en segmentos posterosuperiores o anterolaterales. El tiempo quirúrgico (355 minutos vs 212 minutos), las pérdidas hemáticas (600 mililitros vs 410 mililitros), y la estancia hospitalaria (8,5 días vs 7 días) fueron mayores de forma estadísticamente significativa en el grupo de segmentos posterosuperiores, pero sin diferencias en cuanto a la tasa de conversión, complicaciones postoperatorias, y supervivencia a los 5 años.

A pesar de todos estos resultados que indican una mayor dificultad técnica en la resección de estos segmentos, la tasa de complicaciones similar sugiere que se trata de una cirugía segura. Por tanto, consideramos que la dificultad técnica no debe ser una contraindicación para la indicación de resección laparoscópica de lesiones localizadas en estos segmentos. Estudios y aplicaciones como la desarrollada por nuestro grupo, ayudan a valorar la complejidad, así como anticipar y prevenir posibles complicaciones durante la intervención y planificar la cirugía de la forma más eficiente y segura.

Otros estudios han establecido sistemas de puntuación de dificultad para la cirugía hepática laparoscópica que consideran principalmente el tamaño del tumor, la localización, la proximidad a los grandes vasos, el tipo de resección y la función hepática. Estos scores se correlacionan con la pérdida sanguínea intraoperatoria, el tiempo quirúrgico, la tasa de conversión a cirugía abierta y la morbilidad, por lo que son útiles para establecer la indicación

de cirugía hepática laparoscópica. La mayoría de estos scores intentan evaluar la dificultad quirúrgica de forma preoperatoria.

4.2. FACTORES RELACIONADOS CON LOS RESULTADOS DE LA CIRUGÍA

Para la predicción de los resultados de la cirugía, el tipo de resección y el tamaño de la lesión más grande volvieron a ser las dos variables más relevantes. En cambio, la edad fue la tercera variable con mayor importancia.

Este estudio multicéntrico retrospectivo¹⁰⁰ analizó los factores de riesgo para las complicaciones postoperatorias de los pacientes intervenidos de cirugía laparoscópica pura de tumores localizados en los segmentos posterosuperiores. En el análisis univariable, el grado Child-Pugh B, el tamaño de la lesión ≥ 3 centímetros, la proximidad del tumor a las venas hepáticas, la segmentectomía y la cirrosis, fueron identificados como factores de riesgo significativos para complicaciones postquirúrgicas severas. En el análisis multivariante, el tamaño ≥ 3 centímetros, el tipo de resección (segmentectomía) y la presencia de cirrosis, fueron factores de riesgo independientes de complicaciones graves postoperatorias. La tasa de complicaciones severas, la media de pérdida sanguínea intraoperatoria, el tiempo quirúrgico y la estancia hospitalaria, fueron menores en los pacientes sin ninguno de estos tres factores de riesgo que en aquellos que presentaban al menos uno de ellos. Por tanto, concluyen que aquellos pacientes sin estos factores de riesgo pueden ser buenos candidatos para realizar una resección hepática laparoscópica segura con preservación del parénquima.

Debido a que los segmentos posterosuperiores derechos del hígado presentan una localización profunda, a nivel subfrénico en la caja torácica, obtener una buena visión quirúrgica laparoscópica para la disección así como para el acceso a los pedículos glissonianos de los segmentos 7 y 8 es técnicamente compleja, especialmente en lesiones de mayor tamaño. Estas lesiones más grandes suelen implicar una mayor área de transección, y por tanto, mayor riesgo de pérdidas hemáticas y de complicaciones postoperatorias como la fuga biliar. Es por ello que por lo general se considera que los tumores ≥ 3 centímetros o los que requieren resecciones mayores a una segmentectomía aumentan el riesgo de complicaciones postoperatorias graves relacionadas con la cirugía. Igualmente, en pacientes con cirrosis hepática, la dificultad técnica

y el riesgo de sangrado aumentan. Por ello, en este último estudio los pacientes sin estos tres factores de riesgo presentaron menor tasa de complicaciones postoperatorias graves, menor pérdida de sangre intraoperatoria, menor tiempo quirúrgico y menor estancia hospitalaria, y tenían una tendencia a una menor tasa de conversión a cirugía abierta que aquellos pacientes que presentaban al menos uno de estos tres factores.

En cuanto a la edad, este estudio¹⁰¹ que comparó los resultados de la cirugía hepática laparoscópica de MHCCR en pacientes entre 60-69 años y pacientes ≥ 70 años, observó que los pacientes de mayor edad presentaban mayor índice de comorbilidad de Charlson, mayor proporción de QT neoadyuvante y ASA score, así como mayor tasa de conversión pero sin diferencias significativas en cuanto al procedimiento, el tiempo quirúrgico, la pérdida sanguínea o las complicaciones postoperatorias, ni la supervivencia. Esta revisión sistemática anteriormente mencionada⁹⁷, no obtuvo diferencias significativas entre los datos de los estudios que incluyeron pacientes con una mediana de edad más alta (> 70 años) o baja (< 55 años).

4.3. FACTORES RELACIONADOS CON LA CONVERSIÓN A CIRUGÍA ABIERTA

La tasa de conversión de la cirugía hepática laparoscópica se sitúa en torno al 4%. Aunque la conversión a cirugía abierta no debe considerarse un fracaso del abordaje laparoscópico, este hecho implica la pérdida de algunos de los beneficios de la cirugía mínimamente invasiva. De hecho, un retraso en la conversión en caso de dificultad técnica o complicación hemorrágica se ha relacionado con mayor tasa de complicaciones y una mayor estancia hospitalaria.

La resección laparoscópica de las lesiones de los segmentos posterosuperiores hepáticos supone un procedimiento complejo incluso para cirujanos experimentados, por la dificultad para obtener un adecuado campo quirúrgico, y por tanto, si no se consigue esto, aumenta la dificultad para obtener márgenes tumorales adecuados y un buen control en caso de que se produzca una complicación hemorrágica. Además, los instrumentos habituales de laparoscopia son rígidos y a veces de longitud insuficiente para esta localización anatómica profunda, y el propio hígado puede dificultar su movimiento.

Para superar las limitaciones técnicas de la cirugía laparoscópica de estos segmentos, existen ciertos recursos para facilitar la exposición de dicha área anatómica, como la colocación de trócares intercostales o transdiafragmáticos, el abordaje lateral, dorsal o la colocación de la paciente en posición de decúbito lateral izquierdo, o maniobras modificadas para la suspensión del hígado (hanging maneuver), o la utilización de endoscopios flexibles o del verde indocianina para marcar los límites de resección o un pedículo glissoniano específico⁹⁹.

Por todo ello, otro aspecto analizado en nuestro estudio es la probabilidad de conversión a cirugía abierta. Son muchos los factores analizados y conocidos que influyen en el riesgo de conversión durante una resección hepática laparoscópica. Uno de estos factores es la cirugía de los segmentos posterosuperiores, que se asocia a una tasa de conversión más elevada que en otros segmentos.

Sin embargo, la causa más frecuente para la conversión a cirugía abierta durante la resección hepática laparoscópica es el control del sangrado intraoperatorio, especialmente en hígados cirróticos, y se estima una tasa de hasta un 12% de los casos¹⁰¹ por este motivo. Otras causas son conseguir adecuados márgenes de resección para obtener un buen resultado oncológico, la dificultad técnica o para localizar la lesión, y las adherencias, así como un tiempo quirúrgico prolongado^{100, 102}. Otros estudios sugieren la edad mayor a 75 años, la quimioterapia neoadyuvante, un IMC elevado, el tamaño de la lesión, el tipo o extensión de la resección, la cirrosis, la etiología maligna de la lesión, una resección hepática previa o la cercanía a estructuras vasculares mayores, como otros factores de riesgo de conversión. Además, en este estudio de 2017 que analiza 2861 casos¹⁰², los pacientes que se convirtieron a cirugía abierta presentaron mayor tasa de estancia en UCI y estancia hospitalaria, mayor tasa de complicaciones con mayor gravedad de las mismas (según la clasificación de Clavien-Dindo), y mayor mortalidad a los 30 y a los 90 días.

Los factores preoperatorios más frecuentes asociados con la decisión del cirujano de realizar cirugía abierta son el número de lesiones, el tamaño de la lesión por encima de 3 centímetros, la localización profunda, la cercanía a estructuras vasculares mayores y la distribución de las lesiones en más de un segmento⁹⁸.

En este análisis de casos consecutivos¹⁰³ el objetivo era identificar los factores predictivos de conversión a cirugía abierta en 265 resecciones hepáticas laparoscópicas realizadas en un periodo de 8 años, centrándose en las causas de conversión, los aspectos técnicos y los resultados. La tasa de conversión fue del 6,4%, siendo los eventos hemorrágicos la principal causa para ello. No hubo diferencias significativas en cuanto a la edad, el género, cirugías abdominales previas, el número o tamaño de la lesión o lesiones, la presencia de cirrosis hepática, la quimioterapia neoadyuvante o un IMC >28. Los pacientes en los que se realizó conversión tuvieron una estancia hospitalaria mayor, pero sin suponer una mayor tasa de complicaciones postquirúrgicas. Los factores predictivos para la conversión a cirugía abierta fueron la resección laparoscópica de los segmentos posterosuperiores y la hepatectomía mayor. El análisis multivariante mostró que la resección de los segmentos posterosuperiores era una variable independiente de conversión.

En nuestro trabajo se detectaron diferencias en cuanto a la variable localización del tumor, con una mayor probabilidad de conversión de forma estadísticamente significativa en aquellos pacientes con lesiones en el segmento 7, incluso en comparación con el grupo en el que había lesiones en ambos segmentos 7 y 8.

Igualmente, cuando realizamos el análisis estadístico para las variables numéricas en función de la conversión a cirugía abierta se encontraron diferencias significativas para las variables pérdida sanguínea, complicaciones y tiempo quirúrgico.

Para el resto de variables que se contemplan en la literatura, como el tipo de resección, la proximidad a estructuras vasculares mayores, la hepatectomía previa o no, la presencia de hepatopatía o si había recibido quimioterapia, tuvieron escasa diferencia o no estadísticamente significativa.

Por todo lo anterior es importante buscar un modelo de predicción adecuado que permita determinar de forma preoperatoria no sólo el riesgo de conversión, sino también la dificultad de un caso basado en factores propios de la lesión, de la cirugía y del paciente, con el objetivo de crear una herramienta que ayude a los cirujanos a seleccionar los casos para minimizar el riesgo de conversión a cirugía abierta.

En este sentido, y según nuestro modelo, la cirugía mínimamente invasiva del segmento 7 tiene una probabilidad más elevada de conversión a cirugía abierta de forma estadísticamente significativa, especialmente cuando se asocia a una mayor pérdida de sangre y un mayor tiempo quirúrgico. Esta variable, la localización del tumor, sería más determinante que cualquier otro factor.

Estos resultados van acordes a lo que podemos encontrar de la literatura publicada en cuanto a la cirugía de estos dos segmentos. En este estudio multicéntrico internacional¹⁰⁴ que evaluaba los resultados globales en cirugía hepática laparoscópica para los segmentos 7 y 8, se observó que en el segmento 8 la tendencia era realizar resecciones parciales, frente al segmento 7 donde se realizaron más seccionectomías posteriores derechas o hepatectomías derechas. Además, el uso de un abordaje asistido con la mano o híbrido y no laparoscópico puro fue mayor para el abordaje de lesiones en el segmento 7. Aun así, no hubo diferencias significativas en los resultados postoperatorios entre ambos segmentos.

5. FUTURO

Los modelos explicables de IA tendrán un gran impacto en el futuro de la cirugía hepática, así como en otros campos de la cirugía y la medicina en general. Es fundamental continuar con este tipo de estudios para ver cómo pueden ser más útiles y conseguir más rendimiento de ellos, así como continuar investigando para aprender a utilizarlos y ser capaces de interpretar mejor sus resultados y aplicarlos en la práctica clínica.

Este tipo de modelos se presentan como una alternativa a la estadística bayesiana clásica y permiten encontrar asociaciones estadísticas más fuertes y con mejor capacidad predictiva. Parte del potencial clínico de la IA radica en su capacidad para analizar conjuntos de datos de diversas características. Por el contrario, uno de los problemas reside en que es necesario introducir un cada vez mayor número de datos y pacientes para entender cómo el modelo es capaz de predecir lo que va a ocurrir y generalizar sus resultados. La recopilación de grandes cantidades de datos médicos para generar una base de datos a nivel internacional sería útil para el intercambio de conocimientos entre profesionales, como por ejemplo bases de vídeos quirúrgicos de casos o anatomías complejas, con datos en cuanto a la fase preope-

ratoria, intraoperatoria y postoperatoria, para generar conclusiones y en base a ello modelos de predicción de resultados.

La aplicación y valor de la IA en el ámbito intraoperatorio, como la asistencia durante una intervención quirúrgica o en la toma de decisiones en tiempo real, sin embargo, es un ámbito mucho más complejo y un campo en desarrollo.

En este sentido hay que destacar, por ejemplo, que las imágenes de vídeos quirúrgicos tienen más variabilidad, en cuanto a la calidad, objetos visualizados en el campo, estructuras anatómicas o vasculares mal definidas, parcialmente ocultas o tejidos inespecíficos. Se realizó un estudio¹⁰⁵ para entrenar redes neuronales con el fin de realizar una segmentación de las imágenes e identificar zonas seguras y peligrosas de disección, así como la anatomía objetivo, durante una colecistectomía laparoscópica. Esto también tiene importancia para el futuro de la cirugía robótica, de cara a aumentar cada vez más el automatismo de los gestos quirúrgicos, así como en el campo de la formación y ayudar en la toma de decisiones intraoperatorias.

Además, la reciente aparición de la cirugía robótica hace necesario un sistema de navegación en tiempo real para la hepatectomía, ya que, a diferencia de la cirugía laparoscópica, en la cirugía robótica se carece de información táctil y se basa totalmente en señales visuales, lo que sigue siendo una limitación importante para los cirujanos.

Estos y otros avances en otros campos de la medicina y tecnología pueden favorecer el aumento de las capacidades de la IA en el ámbito quirúrgico. El potencial de la IA es difícil de predecir actualmente, por tanto, los profesionales sanitarios deben ser conscientes y participar en el desarrollo y aplicabilidad de sus avances para asegurar su correcto uso.

Por otra parte, a medida que la IA es empleada en más campos y de forma más generalizada, surge la cuestión de que sus resultados puedan tener un sesgo. Estos posibles sesgos pueden tener su origen en los datos empleados para el entrenamiento o prueba del modelo, o en el mecanismo o razonamiento del propio modelo. El empleo de modelos de aprendizaje automático con datos individualizados para cada paciente permite calcular probabilidades de resultados individualizados, en lugar de categorizar a los pacientes en grupos de riesgo como los scores de riesgo quirúrgico habituales. Sin embargo, una preocupación es que los centros

que desarrollan este tipo de algoritmos empleen los datos de sus propios pacientes y no reflejen de forma precisa la población real, o que estos modelos no estén disponibles a nivel público, lo que limita su validación externa.

Otro límite en el uso de la IA es la confianza de la población, incluso de los profesionales sanitarios, en la toma de decisiones médicas humanas, la creencia de que las decisiones tomadas por los especialistas son mejores que aquellas realizadas por un algoritmo, ya que se considera que no son capaces de realizar una evaluación individualizada, de aprender y mejorar de sus errores, de adaptarse a circunstancias excepcionales o cambiantes, son menos fáciles de entender y es más difícil responsabilizar a la IA de los posibles errores¹⁰⁶.

VI. CONCLUSIONES

Podemos concluir:

- Los beneficios de la cirugía laparoscópica están reconocidos, con mejores resultados en cuanto a estancia hospitalaria, calidad de vida, recuperación funcional y menor tasa de complicaciones.
- La utilización de la IA con la creación de modelos predictivos y de apoyo en la toma de decisiones basados en el aprendizaje automático y en el aprendizaje profundo puede favorecer el desarrollo de algoritmos personalizados de riesgo quirúrgico, enfocados en la predicción de complicaciones y selección del tratamiento ideal para cada paciente.
- En nuestro estudio probamos que la IA es capaz de proporcionar modelos de predicción válidos en cuanto a la complejidad y resultados de la cirugía hepática laparoscópica de los segmentos 7 y 8, en función de determinadas características de cada paciente y de cada lesión. Esto permite una orientación más adecuada de cada caso para minimizar la morbilidad y facilitar el proceso de toma de decisiones quirúrgicas en las intervenciones laparoscópicas de estos segmentos complejos.
- Identificamos además factores que pueden influir en la probabilidad de conversión a cirugía abierta, como la localización del tumor en el segmento 7, las pérdidas hemáticas, las complicaciones y el tiempo quirúrgico.

VII. BIBLIOGRAFÍA

1. Sibulesky L. Normal liver anatomy. Clin Liver Dis (Hoboken). 2013;2(Suppl 1):S1-S3. Published 2013 Mar 29. doi:10.1002/cld.124.
2. Yoo PS, Enestvedt CK, Kulkarni S. Anatomic considerations in the surgical resection of hepatocellular carcinoma. J Clin Gastroenterol. 2013;47 Suppl:S11-S15. doi:10.1097/MCG.0b013e318280ce5f.
3. Manterola, Carlos, Mariano del Sol, Nicolas Ottone, and Tamara Otzen. Radiological and Surgical Anatomy of the Liver and Fundamentals of the Various Options Liver Resections. International Journal of Morphology 35, no. 4 (2017): 1525+.
4. Castaing D., Veilhan L.-A. Anatomie du foie et des voies biliaires. EMC (Elsevier Masson SAS, Paris), Techniques chirurgicales - Appareil digestif, 40-760, 2006.
5. Robles R, Parrilla P. Guía clínica de la Asociación española de cirugía. Cirugía Hepática 2ª ed. Madrid: Editorial Arán; 2018.
6. Gotohda N, Cherqui D, Geller DA, et al. Expert Consensus Guidelines: How to safely perform minimally invasive anatomic liver resection. J Hepatobiliary Pancreat Sci. 2022;29(1):16-32. doi:10.1002/jhbp.1079.
7. Sulpice L, Desfourneaux V, Rayar M, Meunier B, Lakehal M, Bentabak K, et al. Técnicas de trasplante hepático en adultos. EMC - Técnicas quirúrgicas - Aparato digestivo 2013;29(3):1-28 [Artículo E – 40-790].
8. Couinaud C. The vasculo-biliary sheath. Surgical anatomy of the liver revisited. Paris: pers Ed; 1989. p. 29–39.
9. Lin TYC, Liu TK. Total right hepatic lobectomy for primary hepatoma. Surgery. 1960;48:1048–60.
10. Tung TTQN. A new technique for operating on the liver. Lancet. 1963;26:192–3.
11. Takasaki K. New anatomic liver resection using Glissonean approach. Operation. 1986;40:7–14.

12. Pringle JH. V. Notes on the Arrest of Hepatic Hemorrhage Due to Trauma. *Ann Surg.* 1908;48(4):541-549. doi:10.1097/00000658-190810000-00005.
13. Wakabayashi G, Cherqui D, Geller DA, et al. The Tokyo 2020 terminology of liver anatomy and resections: Updates of the Brisbane 2000 system. *J Hepatobiliary Pancreat Sci.* 2022;29(1):6-15. doi:10.1002/jhbp.1091.
14. Sugioka A, Kato Y, Tanahashi Y. Systematic extrahepatic Glissonean pedicle isolation for anatomical liver resection based on Laennec's capsule: proposal of a novel comprehensive surgical anatomy of the liver. *J Hepatobiliary Pancreat Sci.* 2017;24(1):17-23.
15. Couinaud C. Le foie. Études anatomiques et chirurgicales. Paris: Masson; 1957.
16. Nagino M, DeMatteo R, Lang H, et al. Proposal of a New Comprehensive Notation for Hepatectomy: The "New World" Terminology. *Ann Surg.* 2021;274(1):1-3. doi:10.1097/SLA.0000000000004808.
17. Takasaki K, Kobayashi S, Tanaka S, Saito A, Yamamoto M, Hanyu F. Highly anatomically systematized hepatic resection with Glissonean sheath code transection at the hepatic hilus. *Int Surg.* 1990;75(2):73-77.
18. Makuuchi M, Hasegawa H, Yamazaki S. Ultrasonically guided subsegmentectomy. *Surg Gynecol Obstet.* 1985;161(4):346-350.
19. Kumon M, Kumon T, Tsutsui E, et al. Definition of the caudate lobe of the liver based on portal segmentation. *Glob Health Med.* 2020;2(5):328-336. doi:10.35772/ghm.2020.01088.
20. Morise Z. Developments and perspectives of laparoscopic liver resection in the treatment of hepatocellular carcinoma. *Surg Today.* 2019;49(8):649-655. doi:10.1007/s00595-019-1765-9.
21. Fuks D, Tranchart H, Gayet B. Hepatectomías por vía laparoscópica. *EMC - Técnicas quirúrgicas - Aparato digestivo* 2017;33(4):1-13 [Artículo E – 40-768].

22. Robles R, Marín C, Abellán B, López A, Pastor P, Parrilla P. A new approach to hand-assisted laparoscopic liver surgery. *Surg Endosc.* 2008;22(11):2357-2364. doi:10.1007/s00464-008-9770-x.
23. Bismuth H, Castaing D, Kunstlinger F. L'échographie per-opératoire en chirurgie hépato-biliaire [Peroperative echography in hepatobiliary surgery]. *Presse Med.* 1984;13(30):1819-1822.
24. Reich H, McGlynn F, DeCaprio J, Budin R. Laparoscopic excision of benign liver lesions. *Obstet Gynecol.* 1991;78(5 Pt 2):956-958.
25. Azagra JS, Goergen M, Gilbert E, Jacobs D. Laparoscopic anatomical (hepatic) left lateral segmentectomy-technical aspects. *Surg Endosc.* 1996;10(7):758-761. doi:10.1007/BF00193052.
26. Vigano L, Laurent A, Tayar C, Tomatis M, Ponti A, Cherqui D. The learning curve in laparoscopic liver resection: improved feasibility and reproducibility. *Ann Surg.* 2009;250(5):772-782. doi:10.1097/SLA.0b013e3181bd93b2.
27. Tzanis D, Shivathirthan N, Laurent A, et al. European experience of laparoscopic major hepatectomy. *J Hepatobiliary Pancreat Sci.* 2013;20(2):120-124. doi:10.1007/s00534-012-0554-2.
28. Buell JF, Cherqui D, Geller DA, et al. The international position on laparoscopic liver surgery: The Louisville Statement, 2008. *Ann Surg.* 2009;250(5):825-830. doi:10.1097/sla.0b013e3181b3b2d8.
29. Nomi T, Fuks D, Govindasamy M, Mal F, Nakajima Y, Gayet B. Risk factors for complications after laparoscopic major hepatectomy. *Br J Surg.* 2015;102(3):254-260. doi:10.1002/bjs.9726.
30. Abu Hilal M, Aldrighetti L, Dagher I, et al. The Southampton Consensus Guidelines for Laparoscopic Liver Surgery: From Indication to Implementation. *Ann Surg.* 2018;268(1):11-18. doi:10.1097/SLA.0000000000002524.

31. Wakabayashi G, Cherqui D, Geller DA, et al. Recommendations for laparoscopic liver resection: a report from the second international consensus conference held in Morioka. *Ann Surg*. 2015;261(4):619-629. doi:10.1097/SLA.0000000000001184.
32. Fretland ÅA, Dagenborg VJ, Bjørnelv GMW, et al. Laparoscopic Versus Open Resection for Colorectal Liver Metastases: The OSLO-COMET Randomized Controlled Trial. *Ann Surg*. 2018;267(2):199-207. doi:10.1097/SLA.0000000000002353. .
33. Nota CL, Woo Y, Raoof M, et al. Robotic Versus Open Minor Liver Resections of the Posterosuperior Segments: A Multinational, Propensity Score-Matched Study. *Ann Surg Oncol*. 2019;26(2):583-590. doi:10.1245/s10434-018-6928-1.
34. Luo LX, Yu ZY, Bai YN. Laparoscopic hepatectomy for liver metastases from colorectal cancer: a meta-analysis. *J Laparoendosc Adv Surg Tech A*. 2014;24(4):213-222. doi:10.1089/lap.2013.0399.
35. Robles-Campos R, Lopez-Lopez V, Brusadin R, et al. Open versus minimally invasive liver surgery for colorectal liver metastases (LapOpHuva): a prospective randomized controlled trial. *Surg Endosc*. 2019;33(12):3926-3936. doi:10.1007/s00464-019-06679-0.
36. Ker CG, Chen JS, Kuo KK, et al. Liver Surgery for Hepatocellular Carcinoma: Laparoscopic versus Open Approach. *Int J Hepatol*. 2011;2011:596792. doi:10.4061/2011/596792.
37. Regmi P, Hu HJ, Paudyal P, et al. Is laparoscopic liver resection safe for intrahepatic cholangiocarcinoma? A meta-analysis. *Eur J Surg Oncol*. 2021;47(5):979-989. doi:10.1016/j.ejso.2020.11.310.
38. Li HJ, Wang Q, Yang ZL, et al. Laparoscopic versus open hepatectomy for intrahepatic cholangiocarcinoma: Systematic review and meta-analysis of propensity score-matched studies. *Eur J Surg Oncol*. 2023;49(4):700-708. doi:10.1016/j.ejso.2023.02.010.
39. Wang M, Qin T, Zhang H, et al. Laparoscopic versus open surgery for perihilar cholangiocarcinoma: a multicenter propensity score analysis of short- term outcomes. *BMC Cancer*. 2023;23(1):394. Published 2023 May 3. doi:10.1186/s12885-023-10783-9.

40. Lopez-Lopez V, Ome Y, Kawamoto Y, Ruiz AG, Campos RR, Honda G. Laparoscopic Liver Resection of Segments 7 and 8: from the Initial Restrictions to the Current Indications. *J Minim Invasive Surg.* 2020;23(1):5-16. doi:10.7602/jmis.2020.23.1.5.
41. Araki K, Kubo N, Watanabe A, Kuwano H, Shirabe K. Systematic review of the feasibility and future of laparoscopic liver resection for difficult lesions. *Surg Today.* 2018;48(7):659-666. doi:10.1007/s00595-017-1607-6.
42. Aghayan DL, Fretland ÅA, Kazaryan AM, et al. Laparoscopic versus open liver resection in the posterosuperior segments: a sub-group analysis from the OSLO-COMET randomized controlled trial. *HPB (Oxford).* 2019;21(11):1485-1490. doi:10.1016/j.hpb.2019.03.358.
43. Okuno M, et al. Operative and short-term oncologic outcomes of laparoscopic versus open liver resection for colorectal liver metastases located in the posterosuperior liver: a propensity score matching analysis. *Surg Endosc.* 2018;32(4):1776-1786.
44. Liu R, Abu Hilal M, Wakabayashi G, et al. International experts consensus guidelines on robotic liver resection in 2023. *World J Gastroenterol.* 2023;29(32):4815-4830. doi:10.3748/wjg.v29.i32.4815.
45. Masetti M, et al. Minimally invasive treatment of colorectal liver metastases: does robotic surgery provide any technical advantages over laparoscopy? A multicenter analysis from the IGoMILS registry. *Updates Surg.* 2022;74(2):535-545.
46. Rojas AE, Paterakos P, Choi SH. Robotic Central Bisectionectomy for Centrally Located Hepatic Malignant Tumor. *Ann Surg Oncol.* Published online March 31, 2022. doi:10.1245/s10434-022-11646-6.
47. Lopez-Lopez V EIVPeaRPCASFitCoMILSASO2, doi:10.1245/s10434-023-14613-x 31.
48. Ramesh AN, Kambhampati C, Monson JR, Drew PJ. Artificial intelligence in medicine. *Ann R Coll Surg Engl.* 2004;86(5):334-338. doi:10.1308/147870804290.
49. Colom R, Karama S, Jung RE, Haier RJ. Human intelligence and brain networks. *Dialogues Clin Neurosci.* 2010;12(4):489-501. doi:10.31887/DCNS.2010.12.4/colom.

50. Hamet P, Tremblay J. Artificial intelligence in medicine. *Metabolism*. 2017;69S:S36-S40. doi:10.1016/j.metabol.2017.01.011.
51. Mintz Y, Brodie R. Introduction to artificial intelligence in medicine. *Minim Invasive Ther Allied Technol*. 2019;28(2):73-81. doi:10.1080/13645706.2019.1575882.
52. Ahn JC, Qureshi TA, Singal AG, Li D, Yang JD. Deep learning in hepatocellular carcinoma: Current status and future perspectives. *World J Hepatol*. 2021;13(12):2039-2051. doi:10.4254/wjh.v13.i12.2039.
53. Baxt WG. Use of an artificial neural network for data analysis in clinical decision-making: the diagnosis of acute coronary occlusion. *Neural Comput* 1990; 2: 480–9.
54. Stamey TA, Barnhill SD, Zang Z. Effectiveness of ProstAsure™ in detecting prostate cancer (PCa) and benign prostatic hyperplasia (BPH) in men age 50 and older. *J Urol* 1996; 155: 436A.
55. Hinton GE, Salakhutdinov RR. Reducing the dimensionality of data with neural networks. *Science*. 2006;313(5786):504-507. doi:10.1126/science.1127647.
56. Zhou LQ, Wang JY, Yu SY, et al. Artificial intelligence in medical imaging of the liver. *World J Gastroenterol*. 2019;25(6):672-682. doi:10.3748/wjg.v25.i6.672.
57. Bodenstedt S, Wagner M, Müller-Stich BP, Weitz J, Speidel S. Artificial Intelligence-Assisted Surgery: Potential and Challenges. *Visc Med*. 2020;36(6):450-455. doi:10.1159/000511351.
58. Litjens G, Kooi T, Bejnordi BE, et al. A survey on deep learning in medical image analysis. *Med Image Anal*. 2017;42:60-88. doi:10.1016/j.media.2017.07.005.
59. Lee HW, Sung JJY, Ahn SH. Artificial intelligence in liver disease. *J Gastroenterol Hepatol*. 2021;36(3):539-542. doi:10.1111/jgh.15409.
60. Solanki SL, Pandrowala S, Nayak A, Bhandare M, Ambulkar RP, Shrikhande SV. Artificial intelligence in perioperative management of major gastrointestinal surgeries. *World J Gastroenterol*. 2021;27(21):2758-2770. doi:10.3748/wjg.v27.i21.2758.

61. Lopez-Lopez V, Maupoey J, López-Andujar R, et al. Machine Learning-Based Analysis in the Management of Iatrogenic Bile Duct Injury During Cholecystectomy: a Nationwide Multicenter Study. *J Gastrointest Surg.* 2022;26(8):1713-1723.
62. Nam D, Chapiro J, Paradis V, Seraphin TP, Kather JN. Artificial intelligence in liver diseases: Improving diagnostics, prognostics and response prediction. *JHEP Rep.* 2022;4(4):100443. Published 2022 Feb 2. doi:10.1016/j.jhepr.2022.100443.
63. Rajesh A, Chartier C, Asaad M, Butler CE. A Synopsis of Artificial Intelligence and its Applications in Surgery. *Am Surg.* 2023;89(1):20-24. doi:10.1177/00031348221109450.
64. Balsano C, Burra P, Duvoux C, et al. Artificial Intelligence and liver: Opportunities and barriers. *Dig Liver Dis.* 2023;55(11):1455-1461. doi:10.1016/j.dld.2023.08.048.
65. Yokota H, Goto M, Bamba C, Kiba M, Yamada K. Reading efficiency can be improved by minor modification of assigned duties; a pilot study on a small team of general radiologists. *Jpn J Radiol.* 2017;35(5):262-268. doi:10.1007/s11604-017-0629-8.
66. Hassan TM, Elmogy M, Sallam E-S. Diagnosis of focal liver diseases based on deep learning technique for ultrasound images. *Arab. J. Sci. Eng.* 2017; 42: 3127–40.
67. Ben-Cohen A, Klang E, Diamant I, et al. CT Image-based Decision Support System for Categorization of Liver Metastases Into Primary Cancer Sites: Initial Results. *Acad Radiol.* 2017;24(12):1501-1509. doi:10.1016/j.acra.2017.06.008.
68. Ibragimov B, Toesca D, Chang D, Koong A, Xing L. Combining deep learning with anatomical analysis for segmentation of the portal vein for liver SBRT planning. *Phys Med Biol.* 2017;62(23):8943-8958. Published 2017 Nov 10. doi:10.1088/1361-6560/aa9262.
69. Lu F, Wu F, Hu P, Peng Z, Kong D. Automatic 3D liver location and segmentation via convolutional neural network and graph cut. *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 2017;12(2):171-182. doi:10.1007/s11548-016-1467-3.
70. Kiani A, Uyumazturk B, Rajpurkar P, et al. Impact of a deep learning assistant on the histopathologic classification of liver cancer. *NPJ Digit Med.* 2020;3:23. Published 2020 Feb 26. doi:10.1038/s41746-020-0232-8.

71. Chen H, He Y, Jia W. Precise hepatectomy in the intelligent digital era. *Int J Biol Sci.* 2020;16(3):365-373. Published 2020 Jan 1. doi:10.7150/ijbs.39387.
72. Spinelli A, Carrano FM, Laino ME, et al. Artificial intelligence in colorectal surgery: an AI-powered systematic review. *Tech Coloproctol.* 2023;27(8):615-629. doi:10.1007/s10151-023-02772-8.
73. Rockstroh M, Franke S, Hofer M, et al. OR.NET: multi-perspective qualitative evaluation of an integrated operating room based on IEEE 11073 SDC. *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 2017;12(8):1461-1469. doi:10.1007/s11548-017-1589-2.
74. Li X, Qi Z, Du H, et al. Deep convolutional neural network for preoperative prediction of microvascular invasion and clinical outcomes in patients with HCCs. *Eur Radiol.* 2022;32(2):771-782. doi:10.1007/s00330-021-08198-w.
75. Lopez-Lopez V, Robles-Campos R, García-Calderon D, et al. Applicability of 3D-printed models in hepatobiliary surgery: results from “LIV3DPRINT” multicenter study. *HPB (Oxford).* 2021;23(5):675-684. doi:10.1016/j.hpb.2020.09.020.
76. Satou S, Aoki T, Kaneko J, et al. Initial experience of intraoperative three-dimensional navigation for liver resection using real-time virtual sonography. *Surgery.* 2014;155(2):255-262. doi:10.1016/j.surg.2013.08.009.
77. Tomioka K, Aoki T, Kobayashi N, et al. Development of a Novel Artificial Intelligence System for Laparoscopic Hepatectomy. *Anticancer Res.* 2023;43(11):5235-5243. doi:10.21873/anticancer.16725.
78. Benjamens S, Dhunoo P, Meskó B. The state of artificial intelligence-based FDA-approved medical devices and algorithms: an online database. *NPJ Digit Med.* 2020;3:118. Published 2020 Sep 11. doi:10.1038/s41746-020-00324-0.
79. Giordano C, Brennan M, Mohamed B, Rashidi P, Modave F, Tighe P. Accessing Artificial Intelligence for Clinical Decision-Making. *Front Digit Health.* 2021;3:645232. Published 2021 Jun 25. doi:10.3389/fdgth.2021.645232.

-
80. Hashimoto DA, Rosman G, Rus D, Meireles OR. Artificial Intelligence in Surgery: Promises and Perils. *Ann Surg*. 2018;268(1):70-76. doi:10.1097/SLA.0000000000002693.
 81. Carstens M, Rinner FM, Bodenstedt S, et al. The Dresden Surgical Anatomy Dataset for Abdominal Organ Segmentation in Surgical Data Science. *Sci Data*. 2023;10(1):3. Published 2023 Jan 12. doi:10.1038/s41597-022-01719-2.
 82. Kitaguchi D, Takeshita N, Matsuzaki H, Igaki T, Hasegawa H, Kojima S, Mori K, Ito M (2022) Real-time vascular anatomical image navigation for laparoscopic surgery: experimental study. *Surg Endosc* 36:6105–6112.
 83. Shademan A, Decker RS, Opfermann JD, Leonard S, Krieger A, Kim PC. Supervised autonomous robotic soft tissue surgery. *Sci Transl Med*. 2016;8(337):337ra64. doi:10.1126/scitranslmed.aad9398.
 84. Taha A, Ochs V, Kayhan LN, et al. Advancements of Artificial Intelligence in Liver-Associated Diseases and Surgery. *Medicina (Kaunas)*. 2022;58(4):459. Published 2022 Mar 22. doi:10.3390/medicina58040459.
 85. Ahn JC, Qureshi TA, Singal AG, Li D, Yang JD. Deep learning in hepatocellular carcinoma: Current status and future perspectives. *World J Hepatol*. 2021;13(12):2039-2051. doi:10.4254/wjh.v13.i12.2039.
 86. Kitaguchi D, Lee Y, Hayashi K, et al. Development and Validation of a Model for Laparoscopic Colorectal Surgical Instrument Recognition Using Convolutional Neural Network-Based Instance Segmentation and Videos of Laparoscopic Procedures.
 87. Veerankutty FH, Jayan G, Yadav MK, et al. Artificial Intelligence in hepatology, liver surgery and transplantation: Emerging applications and frontiers of research. *World J Hepatol*. 2021;13(12):1977-1990. doi:10.4254/wjh.v13.i12.1977.
 88. Une N, Kobayashi S, Kitaguchi D, et al. Intraoperative artificial intelligence system identifying liver vessels in laparoscopic liver resection: a retrospective experimental study. *Surg Endosc*. 2024;38(2):1088-1095. doi:10.1007/s00464-023-10637-2.

89. Sasaki K, Ito M, Kobayashi S, et al. Automated surgical workflow identification by artificial intelligence in laparoscopic hepatectomy: Experimental research. *Int J Surg.* 2022;105:106856. doi:10.1016/j.ijssu.2022.106856.
90. Ruzzenente A, Bagante F, Poletto E, et al. A machine learning analysis of difficulty scoring systems for laparoscopic liver surgery. *Surg Endosc.* 2022;36(12):8869-8880. doi:10.1007/s00464-022-09322-7.
91. Wang J, Zheng T, Liao Y, et al. Machine learning prediction model for post- hepatectomy liver failure in hepatocellular carcinoma: A multicenter study [published correction appears in *Front Oncol.* 2023 Aug 31;13:1278295. doi: 10.3389/fonc.2023.1278295].
92. Chiew CJ, Liu N, Wong TH, Sim YE, Abdullah HR. Utilizing Machine Learning Methods for Preoperative Prediction of Postsurgical Mortality and Intensive Care Unit Admission. *Ann Surg.* 2020;272(6):1133-1139. doi:10.1097/SLA.0000000000003297.
93. Tsilimigras DI, et al. Utilizing Machine Learning for Pre-and Postoperative Assessment of Patients Undergoing Resection for BCLC-0, A and B Hepatocellular Carcinoma: Implications for Resection Beyond the BCLC Guidelines. *Ann Surg Oncol.* 2020;27(3):866-874.
94. Tsilimigras DI, Mehta R, Moris D, et al. A Machine-Based Approach to Preoperatively Identify Patients with the Most and Least Benefit Associated with Resection for Intrahepatic Cholangiocarcinoma: An International Multi-institutional Analysis of 1146 Pati.
95. Antoniadi AM, Galvin M, Heverin M, Hardiman O, Mooney C. Prediction of caregiver quality of life in amyotrophic lateral sclerosis using explainable machine learning. *Sci Rep.* 2021;11(1):12237. Published 2021 Jun 10. doi:10.1038/s41598-021-91632-2.
96. Kawaguchi Y, Fuks D, Kokudo N, Gayet B. Difficulty of Laparoscopic Liver Resection: Proposal for a New Classification. *Ann Surg.* 2018;267(1):13-17. doi:10.1097/SLA.0000000000002176.

97. Taillieu E, De Meyere C, Nuytens F, Verslype C, D'Hondt M. Laparoscopic liver resection for colorectal liver metastases - short- and long-term outcomes: A systematic review. *World J Gastrointest Oncol.* 2021;13(7):732-757. doi:10.4251/wjgo.v13.i7.732.
98. Xiang L, Xiao L, Li J, Chen J, Fan Y, Zheng S. Safety and feasibility of laparoscopic hepatectomy for hepatocellular carcinoma in the posterosuperior liver segments. *World J Surg.* 2015;39(5):1202-1209. doi:10.1007/s00268-015-2946-3.
99. Lee W, Han HS, Yoon YS, et al. Comparison of laparoscopic liver resection for hepatocellular carcinoma located in the posterosuperior segments or anterolateral segments: A case-matched analysis. *Surgery.* 2016;160(5):1219-1226.
100. Shinkawa H, Hirokawa F, Kaibori M, et al. Risk factors for and management of morbidity in pure laparoscopic resection of the right posterosuperior segments of the liver: A multicenter retrospective study. *Asian J Endosc Surg.* 2022;15(3):539-546.
101. Yue M, Li S, Yan G, Li C, Kang Z. Short- and long-term outcomes of laparoscopic hepatectomy for colorectal liver metastases in elderly patients. *Cancer Manag Res.* 2018;10:2581-2587. Published 2018 Aug 10. doi:10.2147/CMAR.S156379.
102. Halls MC, Cipriani F, Berardi G, et al. Conversion for Unfavorable Intraoperative Events Results in Significantly Worse Outcomes During Laparoscopic Liver Resection: Lessons Learned From a Multicenter Review of 2861 Cases. *Ann Surg.* 2018;268(6):1051-1057.
103. Troisi RI, Montalti R, Van Limmen JG, et al. Risk factors and management of conversions to an open approach in laparoscopic liver resection: analysis of 265 consecutive cases. *HPB (Oxford).* 2014;16(1):75-82. doi:10.1111/hpb.12077.
104. Lopez-Lopez V, Morise Z, Gomez Gavara C, et al. Global Outcomes Benchmarks in Laparoscopic Liver Surgery for Segments 7 and 8: International Multicenter Analysis. *J Am Coll Surg.* Published online April 25, 2024. doi:10.1097/XCS.0000000000001100.
105. Madani A, Namazi B, Altieri MS, et al. Artificial Intelligence for Intraoperative Guidance: Using Semantic Segmentation to Identify Surgical Anatomy During Laparoscopic Cholecystectomy. *Ann Surg.* 2022;276(2):363-369. doi:10.1097/SLA.0000000000004594.

106. Cadario R, Longoni C, Morewedge CK. Understanding, explaining, and utilizing medical artificial intelligence. *Nat Hum Behav.* 2021;5(12):1636-1642. doi:10.1038/s41562-021-01146-0. x

VIII. ANEXOS

ANEXO 1. ARTÍCULO PUBLICADO SOBRE NUESTRO ESTUDIO EN SURGICAL ENDOSCOPY

Surgical Endoscopy
<https://doi.org/10.1007/s00464-024-10681-6>



Explainable artificial intelligence prediction-based model in laparoscopic liver surgery for segments 7 and 8: an international multicenter study

Victor Lopez-Lopez¹ · Zeniche Morise² · Mariano Albaladejo-González³ · Concepción Gomez Gavara⁴ · Brian K. P. Goh^{5,6} · Ye Xin Koh^{5,6} · Sijberden Jasper Paul⁷ · Mohammed Abu Hilal^{7,8} · Kohei Mishima⁹ · Jaime Arthur Pirola Krüger¹⁰ · Paulo Herman¹⁰ · Alvaro Cerezuela¹ · Roberto Brusadin¹ · Takashi Kaizu¹¹ · Juan Lujan^{1,12} · Fernando Rotellar¹² · Kazuteru Monden¹³ · Mar Dalmau⁴ · Naoto Gotohda¹⁴ · Masashi Kudo¹⁴ · Akishige Kanazawa¹⁵ · Yutaro Kato¹⁶ · Hiroyuki Nitta¹⁷ · Satoshi Amano¹⁷ · Raffaele Dalla Valle¹⁸ · Mario Giuffrida¹⁸ · Masaki Ueno¹⁹ · Yuichiro Otsuka²⁰ · Daisuke Asano²¹ · Minoru Tanabe²¹ · Osamu Itano²² · Takuya Minagawa²² · Dilmurodjon Eshmuminov²³ · Irene Herrero²⁴ · Pablo Ramírez¹ · José A. Ruipérez-Valiente³ · Ricardo Robles-Campos¹ · Go Wakabayashi⁹

Received: 7 August 2023 / Accepted: 2 January 2024
 © The Author(s) 2024

Abstract

Background Artificial intelligence (AI) is becoming more useful as a decision-making and outcomes predictor tool. We have developed AI models to predict surgical complexity and the postoperative course in laparoscopic liver surgery for segments 7 and 8.

Methods We included patients with lesions located in segments 7 and 8 operated by minimally invasive liver surgery from an international multi-institutional database. We have employed AI models to predict surgical complexity and postoperative outcomes. Furthermore, we have applied SHapley Additive exPlanations (SHAP) to make the AI models interpretable. Finally, we analyzed the surgeries not converted to open versus those converted to open.

Results Overall, 585 patients and 22 variables were included. Multi-layer Perceptron (MLP) showed the highest performance for predicting surgery complexity and Random Forest (RF) for predicting postoperative outcomes. SHAP detected that MLP and RF gave the highest relevance to the variables “resection type” and “largest tumor size” for predicting surgery complexity and postoperative outcomes. In addition, we explored between surgeries converted to open and non-converted, finding statistically significant differences in the variables “tumor location,” “blood loss,” “complications,” and “operation time.”

Conclusion We have observed how the application of SHAP allows us to understand the predictions of AI models in surgical complexity and the postoperative outcomes of laparoscopic liver surgery in segments 7 and 8.

Keywords Artificial intelligence · Making decision · Minimally invasive surgery · Liver resection

