



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

**Facultad de Medicina**

**Departamento de Salud Pública y Psiquiatría**

**Tesis doctoral**

**Evaluación de las nuevas tecnologías en 3D en la  
planificación quirúrgica de fracturas de húmero  
proximal en Cirugía Ortopédica y Traumatología.  
Comparación entre Impresión en 3D y Realidad Virtual**

Doctorando: **Rafael Almirón Santa Bárbara**

Director: **Mario Gutiérrez Bedmar**

Biomedicina, Investigación Traslacional y Nuevas Tecnologías en Salud

Mayo 2023





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

AUTOR: Rafael Almirón Santa Bárbara

 <http://orcid.org/0000-0001-7816-7538>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer obras derivadas.

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga (RIUMA): [riuma.uma.es](http://riuma.uma.es)





## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD DE LA TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL TÍTULO DE DOCTOR

D. RAFAEL ALMIRÓN SANTA BÁRBARA

Estudiante del programa de doctorado BIOMEDICINA, INVESTIGACIÓN TRASLACIONAL Y NUEVAS TECNOLOGÍAS EN SALUD de la Universidad de Málaga, autor de la tesis, presentada para la obtención del título de doctor por la Universidad de Málaga, titulada: EVALUACIÓN DE LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS EN 3D EN LA PLANIFICACIÓN QUIRÚRGICA DE FRACTURAS DE HÚMERO PROXIMAL EN CIRUGÍA ORTOPÉDICA Y TRAUMATOLOGÍA. COMPARACIÓN ENTRE IMPRESIÓN EN 3D Y REALIDAD VIRTUAL

Realizada bajo la tutorización de MARIO GUTIÉRREZ BEDMAR y dirección de MARIO GUTIÉRREZ BEDMAR

DECLARO QUE:

La tesis presentada es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, conforme al ordenamiento jurídico vigente (Real Decreto Legislativo 1/1996, de 12 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual, regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), modificado por la Ley 2/2019, de 1 de marzo.

Igualmente asumo, ante a la Universidad de Málaga y ante cualquier otra instancia, la responsabilidad que pudiera derivarse en caso de plagio de contenidos en la tesis presentada, conforme al ordenamiento jurídico vigente.

En Málaga, a 2 de mayo de 2023

Fdo: RAFAEL ALMIRÓN SANTA BÁRBARA Doctorando	Fdo: MARIO GUTIÉRREZ BEDMAR Tutor
Fdo: MARIO GUTIÉRREZ BEDMAR (Director)	



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## Departamento de Salud Pública y Psiquiatría

**D. MARIO GUTIÉRREZ BEDMAR** Profesor Titular de Medicina Preventiva y Salud Pública de la Facultad de Medicina de la Universidad de Málaga:

CERTIFICA que **D. RAFAEL ALMIRÓN SANTA BÁRBARA** ha obtenido y estudiado personalmente bajo mi dirección los datos clínicos necesarios para la realización de su Tesis Doctoral, titulada: "Evaluación de las nuevas tecnologías en 3D en la planificación quirúrgica de fracturas de húmero proximal en Cirugía Ortopédica y Traumatología. Comparación entre Impresión en 3D y Realidad Virtual" que considero tiene el contenido y rigor científico necesario para ser sometido al superior juicio de la Comisión que nombre la Universidad de Málaga para optar a grado de Doctor.

Y que la publicación en coautoría que avala la presentación de esta tesis y cuya referencia es: ***Almirón Santa-Bárbara R, García Rivera F, Lamb M, Víquez Da-Silva R, Gutiérrez-Bedmar M. New technologies for the classification of proximal humeral fractures: Comparison between Virtual Reality and 3D printed models—a randomised controlled trial. Virtual Reality, 2023, 1–12*** no ha sido utilizada en tesis anteriores ni en la Universidad de Málaga ni en otras Universidades.

Y para que conste, en cumplimiento de las disposiciones vigentes, expido el presente certificado en Málaga a 25 de mayo de 2023.

Firma:

Director y Tutor: Mario Gutiérrez Bedmar



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## Agradecimientos

A mis padres, Charo y Rafael, por haber imbuido en mí la cultura del esfuerzo y darme una educación rica en conocimientos y valores, que me han llevado a no conformarme y enfrentar nuevos retos en pro del crecimiento personal.

A Marina, mi pareja y apoyo en el día a día y en los momentos más sacrificados de esta tesis doctoral. Este trabajo también tiene mucho de ti y tu paciencia. Me siento muy orgulloso de tu esfuerzo diario, y sé que llegarás a donde te propongas.

A mis tutores, Pablo Salinas y Mario Gutiérrez, por haberme ayudado uno en el inicio y otro en el nudo y desenlace de este proyecto personal del que me siento tan orgulloso. Sin vosotros este proyecto no existiría.

A mi amigo y compañero Francisco Rivera, Paco, el mayor ejemplo en mi vida de que siempre hay que aferrarse a la parte buena de las cosas, porque ello traerá siempre algo positivo. Un acompañante inesperado que ha acabado haciendo el camino conmigo por muchos años, al que admiro y respeto, gracias por tu ayuda en este proyecto y los que están por venir.

A los Residentes de los hospitales implicados en esta investigación (Antequera, Virgen de las Nieves y Virgen de la Victoria, año 2022), tanto del mío de origen, que me han acompañado en el camino de la residencia, como de los otros dos, que me han acogido como uno más en el grupo y me han hecho sentir parte de la familia. Sin vuestro altruismo y generosidad esto no sería posible. En especial gracias a M. Verdejo, por ser mi guía y referente como residente mayor, y a Migue, Marina, Carlos y Luis que me han acompañado en este último y genial año de residencia.

A mis compañeros de profesión y referentes, los doctores A. Llanos, J. Nogales, J.L. Martín Alguacil, J. De Santos, V. Urbano, M. Barón, A. Fernández de Rota, J.L. Esteban, J. Pérez, A. Leiva, F. Estades, F. Moreno, C. Quesada y S. Reyes, y a la Familia Espejo. Al Comité de Expertos de miembro superior, doctores Egozcue, López García y López Camacho. A los doctores P. Andrés Cano y V. López Soto por haberme guiado y enseñado sobre la modernización de la traumatología. Todos me habéis hecho crecer como traumatólogo en lo profesional y personal, además de incentivar mi afán investigador. A mis adjuntos C. González, D. Peces, M.A. Nagib, J.C. Montosa, A. Jiménez, J. Farfán, A. Abenza, M.P. Escandón y C. Muñoz. Os admiro y respeto en la misma medida que vosotros me habéis respetado a mí.

A mis hermanos de otras madres, mi gran apoyo, Antonio, Alberto, Jesús, José Antonio y Manuel. Me habéis apoyado incondicionalmente en mis empresas y habéis ensalzado ese tiempo que he dedicado a ellas, muchas veces quitándoselo a estar con vosotros.

A mis amigos y compañeros de profesión, Salva Aguilar, Pablo Arjona, Clara Arrieta, Cristi Bandera, Ana Galache, Patri Martín, Melgui, Ale Moriel, Salva Romero, Teo Rudolphi, Alma Ruiz, Ismael Salas, Enrique Sepúlveda y Rodri Víquez. Cada día sois una inspiración.

En esencia, gracias a la vida por darme tanto y ser generosa conmigo.

*“Si has perdido el rumbo escúchame  
llegar a la meta no es vencer  
lo importante es el camino, y en él  
caer, levantarse, insistir, aprender”*

Jesús María Hernández Gil (2005)

*“Nada hay bajo el sol  
que no tenga solución  
nunca una noche venció  
a un amanecer”*

Víctor García González (2002)

*“Si un problema tiene solución no hace falta preocuparse. Si no tiene solución, preocuparse no  
sirve de nada”*

Shantideva – Libro de Bodhicaryavatara (Siglo VIII)

## Producción científica

### Artículos en revistas científicas:

- Almirón Santa-Bárbara, R., García Rivera, F., Lamb, M. *et al.* New technologies for the classification of proximal humeral fractures: Comparison between Virtual Reality and 3D printed models—a randomised controlled trial. *Virtual Reality* (2023). <https://doi.org/10.1007/s10055-023-00757-4>
  - JCR (último en 2021): Q1 en Computer Graphics and Computer-Aided Design

### Comunicaciones a congresos directamente en relación con la presente tesis:

- Rafael Almirón Santa Bárbara, Marina Ubal Berlanga, Carlos Ayllón Salas, Miguel Ángel Martín Moya, Miguel Verdejo Parrilla. Nuevas tecnologías y feedback con el paciente: modelos 3D impresos en fracturas de húmero proximal. SECOT 2022.
- Rafael Almirón Santa Bárbara, Miguel Ángel Martín Moya, Miguel Verdejo Parrilla, María Josefa Espejo Reina, Julieta Passini Sánchez. Nuevas Tecnologías en COT: Optimización de imágenes 3D e importancia en la toma de decisiones y planificación en COT. SATO-SOTIMI-SMACOT 2021.
- Rafael Almirón Santa Bárbara, Marina Ubal Berlanga, Luis Robles Larios. Nuevas tecnologías en COT: uso de planificación 3D en osteotomía desrotadora de hallux valgus. SATO-SOTIMI-SMACOT 2023.

### Asistencia a cursos acreditados relacionados con la tesis:

- 6ª Edición de Curso Impresión 3D en Cirugía Ortopédica y Traumatología. Sevilla, 26 y 27 de noviembre de 2021. Acreditado por San Pablo CEU Andalucía con 2ECTS



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

# Índice

I. Introducción .....	1
I.1. Cirugía Ortopédica y Traumatología .....	1
I.1.1 Perspectiva histórica: pasado y futuro de la especialidad .....	1
I.1.2 Formación especializada en España. Niveles hospitalarios .....	3
I.2. Fracturas de húmero proximal.....	4
I.2.1 Anatomía del hombro .....	4
I.2.2 Epidemiología de las fracturas de húmero proximal .....	12
I.2.3 Importancia socioeconómica del problema .....	13
I.2.4 Clínica y diagnóstico de las fracturas de húmero proximal.....	15
I.2.5 Clasificación de las fracturas de húmero proximal.....	16
I.2.6 Opciones terapéuticas en las fracturas de húmero proximal .....	21
I.2.7 Factores determinantes en la elección terapéutica.....	39
I.3. Impresión 3D .....	43
I.3.1 Antecedentes históricos .....	43
I.3.2 Antecedentes en Medicina y traumatología .....	44
I.3.3 Impresión 3D en fracturas de húmero proximal .....	45
I.4. Realidad Virtual .....	46
I.4.1 Antecedentes: realidad virtual, Metaverso y Oculus .....	46
I.4.2 Antecedentes en Medicina y traumatología .....	47
I.4.3 Software específico: Unity y SideQuest .....	48
II. Justificación y objetivos .....	49
III. Material y métodos .....	51
III.1. Obtención de la muestra de húmeros proximales.....	51
III.2. Obtención de participantes encuestados .....	52
III.3. Clasificación Gold Standard – Comité de Expertos .....	53

III.4. Diseño gráfico del trabajo .....	56
III.4.1 Diseño de las clasificaciones de Neer, HGLS y tratamientos .....	56
III.4.2 Diseño de húmeros en 3D: InVesalius y Meshmixer.....	60
III.4.3 Formularios de satisfacción, utilidad y confianza .....	68
III.5. Fase de pre-asignación .....	70
III.5.1 Diseño del estudio; ¿cómo se pasan los cuestionarios? .....	70
III.5.2 Aleatorización de los participantes por grupos.....	73
III.5.3 Aleatorización del orden de presentación de los casos .....	74
III.5.4 Charla de instrucción previa al cuestionario.....	75
III.6. Diseño del experimento en Realidad Virtual .....	79
III.6.1 Desarrollo del entorno gráfico en Unity y Blender.....	79
III.6.2 Hardware, software y mecánicas de evaluación .....	82
III.6.3 El entorno del experimento virtual.....	89
III.6.4 Mecánica de evaluación en la realidad virtual.....	89
III.7. Diseño del experimento impreso en 3D .....	90
III.7.1 Post-procesado pre-impresión: Ultimaker Cura .....	90
III.7.2 Impresión de los modelos en 3D .....	95
III.7.3 El entorno del experimento.....	100
III.7.4 Mecánica de evaluación con los modelos impresos .....	103
III.8. Análisis de los datos obtenidos .....	103
III.8.1 Ordenación y codificación de los resultados .....	103
III.8.2 Análisis estadístico .....	105
IV. Resultados .....	107
IV.1. Homogeneidad de los grupos .....	107
IV.2. Estudio individual por subgrupos de tasa de acierto .....	108
IV.2.1 Tasa de acierto en base a características de entrevistados.....	108

IV.2.2 Tasa de acierto en base a otras covariables numéricas .....	110
IV.3. Significación y comparación de la tasa de aciertos entre grupos .....	111
IV.4. Otros parámetros estudiados: aciertos en el tratamiento, satisfacción y utilidad .....	112
V. Discusión.....	115
V.1. Nuevas tecnologías en clasificaciones de húmero proximal .....	115
V.2. Realidad Virtual frente a Impresión en 3D .....	117
V.3. Expectativas de futuro.....	119
VI. Conclusiones.....	121
VII. Bibliografía .....	123
VIII. Anexos .....	145
VIII.1. Enlaces al artículo y referencia JCR a día de presentación de la tesis.....	145
VIII.2. Consentimiento informado a los entrevistados .....	146
VIII.3. Consentimiento informado a los pacientes con fractura de húmero proximal .....	151
VIII.4. Permisos concedidos para el uso de imágenes .....	160
VIII.5. Certificado del comité ético .....	164
VIII.6. Conflictos de interés.....	165
VIII.7. Colaboradores del trabajo y agradecimientos .....	165



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## I. Introducción

### I.1. Cirugía Ortopédica y Traumatología

#### I.1.1 Perspectiva histórica: pasado y futuro de la especialidad

Aunque el tratamiento de la patología músculo-esquelética es afrontado desde distintas especialidades a lo largo del mundo, en España todo el tratamiento quirúrgico que concierne a este aparato queda aunado en la especialidad de Cirugía Ortopédica y Traumatología. A lo largo del presente apartado se hará un recorrido histórico al respecto ([Figura 1](#)).

Los inicios de la Cirugía Ortopédica y Traumatología se remontan hasta los orígenes del ser humano. Aunque los datos al respecto son limitados, se han encontrado indicios en restos diversas tribus de la edad antigua que demuestran la formación de callos de fracturas y el uso de férulas primitivas para el tratamiento de las mismas desarrolladas con materiales rudimentarios [Swarup y O'Donnell, 2016].

Las primeras evidencias claras sobre el uso de herramientas y técnicas relacionadas con esta especialidad surgen alrededor del siglo III a.C., apareciendo escritos, y utensilios en torno a ella. Así, en Mesopotamia aparecen los primeros escritos sobre tratamientos de fracturas, mientras que en Egipto se han encontrado artefactos utilizados posiblemente para realizar amputaciones, así como jeroglíficos y pergaminos que describen patologías traumatológicas, entre otras, y sus tratamientos. Entre estos documentos cabe destacar como máximo exponente el papiro de Edwin Smith [Blomstedt, 2014; Swarup y O'Donnell, 2016].

Durante la época grecorromana, surgieron dos grandes figuras en la medicina que arrojaron aportaciones en el campo que compete a la especialidad que nos ocupa. Por un lado, Hipócrates describiría diversas técnicas relacionadas con la reducción de luxaciones, y el tratamiento del pie zambo y las osteomielitis. Por otra parte, Galeno describió en gran medida la anatomía del sistema músculo-esquelético y tomaría parte como médico del coliseo. [Mattick y Wyatt, 2000; Swarup y O'Donnell, 2016; Revelou et al., 2019].

La edad media fue una época eminentemente oscura desde el punto de vista del avance del conocimiento por las fuertes restricciones impuestas por la Iglesia, y esto afectó, entre otros, al campo médico, que se vio estancado durante esta etapa.

La primera etapa de la edad moderna sería el Renacimiento, donde las pequeñas Academias de Medicina fundadas durante la etapa previa se convertirían en eminentes Escuelas, apareciendo entre el antiguo gremio de barberos y cirujanos grandes figuras que traerían el progreso a través de nuevas técnicas e instrumentos, a destacar dos de ellos. Por un lado, Ambroise Paré, considerado padre de la cirugía, aportó a la gnoseología del momento técnicas como el torniquete, la ligadura vascular o la amputación. Por otro lado, Nicholas Andry fue el primero en acuñar el término Ortopedia, y fue el diseñador del árbol de Andry, símbolo de la especialidad. Así, en esta época surge una importante división que delimita las dos partes de la

especialidad, y que continúa existiendo hasta hoy día [Splavski et al., 2020; Jaime Arriagada, 2021]:

- Ortopedia: del griego “orthos” y “paedia”, traducándose como niño enderezado sin malformaciones. Hace alusión al tratamiento de las lesiones del sistema musculoesquelético que no tienen un origen traumático, es decir, de causa congénita o degenerativa principalmente
- Traumatología: del griego “trauma” y “logos”, traducándose como la ciencia del conocimiento de las lesiones o heridas. Abarca al tratamiento de patologías generadas a consecuencia de una fuerza externa.

A partir de aquí, la Cirugía Ortopédica y Traumatología sufre un potente proceso de conversión en lo que podríamos denominar primera gran revolución de la especialidad, que tendría su boom de la mano de grandes hitos como la aparición de la anestesia (William Morton, utilizó el éter por primera vez el 16 de octubre de 1846) o el radiodiagnóstico (Wilhelm Roentgen realizó la primera radiografía el 8 de noviembre de 1895), seguido de la época de las grandes guerras que, inevitablemente, se acompañarían de un aumento del conocimiento sobre esta especialidad.

En la actualidad, se puede hablar de una segunda revolución de la especialidad, con la aparición de un amplio conocimiento basado en la evidencia científica, acompañado de avances en diseño de implantes quirúrgicos. En 1935 se fundaría la SECOT (Sociedad Española de Cirugía Ortopédica y Traumatología) como órgano referencia de la especialidad en nuestro país.

Se puede afirmar, sin duda, que la aparición de nuevas tecnologías ha cambiado el mundo drásticamente en los últimos años, y estas están entrando de lleno en todos los ámbitos de la vida, incluida la especialidad a la que nos referimos. La aparición de nuevas técnicas, como la impresión 3D, la realidad virtual o la creación de implantes biológicos, marca el inicio de un camino que está generando grandes avances en la Cirugía Ortopédica y Traumatología y que, probablemente, demarcará el futuro de esta especialidad.

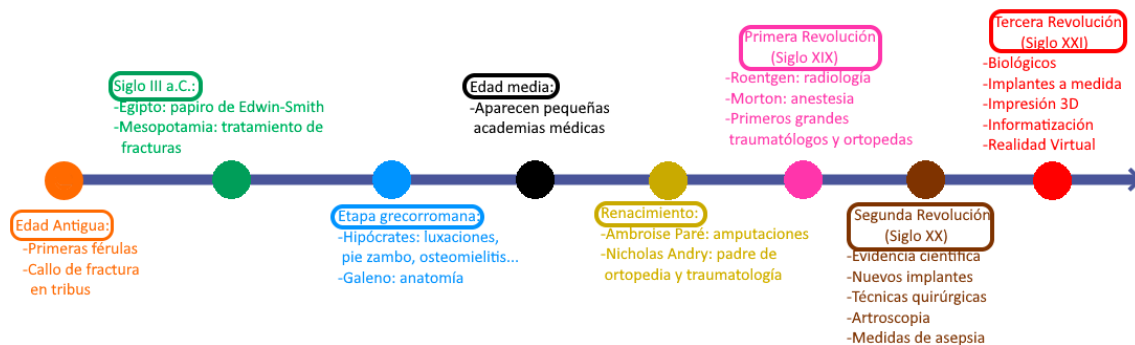


Figura 1. Cronología de la Cirugía Ortopédica y Traumatología. Principales hitos que han influido en el devenir y evolución de la especialidad. Destaca la aparición de nuevas tecnologías que demarcarán previsiblemente las líneas futuras de la especialidad.

## I.1.2 Formación especializada en España. Niveles hospitalarios

En tanto que la base de la investigación de la presente tesis se basa en un estudio sobre residentes de dicha especialidad, cabe hacer una breve mención a la especialidad y su marco legal. El inicio de la especialidad reglada y acreditada de forma homogénea en todos los centros se da en 1978 con la aparición del primer examen MIR. Previamente existían escuelas independientes de cada especialidad no unificadas.

Desde entonces, el número de residentes en formación en España ha ido aumentando hasta las 285 plazas ofertadas por el ministerio para la Especialidad de Cirugía Ortopédica y Traumatología en el presente año 2023.

El programa formativo de esta especialidad se refleja en el BOE número 33, de 7 de febrero de 2007, páginas 5751 a 5755, al cual se puede acceder a través del enlace: <https://www.boe.es/eli/es/o/2007/01/24/sco226/dof/spa/pdf>

Esta formación multidisciplinar está basada, de forma resumida, en una residencia de cinco años en la cual se adquieren competencias básicas sobre las dos partes de la especialidad mencionadas en el apartado previo. A diferencia de otros países, esta especialidad aúna tanto la patología degenerativa como la ósea aguda, formando un compendio generalizado de los problemas quirúrgicos relacionados con el aparato locomotor.

Respecto a los centros formativos acreditados, esta especialidad presenta la particularidad de poderse impartir en hospitales de cualquiera de los grados de la WHO-CHOICE, a saber [Mulligan et al., 2003]:

- Hospitales de primer nivel: definidos como hospitales con limitado número de especialidades y un total de camas por debajo de las 200. En nuestro medio y la presente tesis podríamos destacar los hospitales comarcales, como el Hospital de Antequera.
- Hospitales de segundo nivel: definidos como hospitales con funciones bien diferenciadas y un número de camas de aproximadamente 200 a 800. En nuestro medio podríamos destacar los hospitales clínicos, siendo centros de gran calado en núcleos urbanos que usualmente carecen de algunas especialidades, por ejemplo, el Hospital Clínico Universitario Virgen de la Victoria, participante en nuestro estudio.
- Hospitales de tercer nivel: siendo estos hospitales aquellos en plenitud de equipamiento y dotados de todo tipo de especialidades, con un número de camas de va desde las 300 hasta las 1500. Estos hospitales suelen encontrarse en la capital de cada provincia y disponen de todas las especialidades las cuales, a su vez, ofertarán una cartera de servicios lo más amplia posible dentro de sus competencias. Se puede destacar en Andalucía hospitales como el Virgen del Rocío, Regional Universitario de Málaga, o Complejo Hospitalario Virgen de las Nieves, siendo este último una pieza clave en la presente tesis.

## I.2. Fracturas de húmero proximal

### I.2.1 Anatomía del hombro

El hombro es la zona de transición establecida entre el tronco y la extremidad superior, estando constituida a su vez por cuatro articulaciones que actúan de forma conjunta [Testut y Latarjet, 1996]:

- Esterno-clavicular: es una articulación de doble encaje recíproco estabilizada por un abundante entramado cápsulo-ligamentario (ligamentos superior, inferior, anterior y posterior), permitiendo ligeros movimientos rotacionales a la clavícula respecto a la caja torácica en todos los ejes.
- Escápulo-clavicular: siendo el principal componente de la misma la acromioclavicular, nexo de unión entre la escápula en su porción acromial y la clavícula en su zona más lateral. Es una articulación artrodia, es decir, cuyas superficies constituyentes son planas y, por tanto, permiten una escasa movilidad. Se encuentra rodeada de una cápsula ligamentaria y contiene en un 66% de personas un pequeño menisco o fibrocartilago en su interior. El otro componente de la articulación escápulo-clavicular es la unión entre clavícula y coracoides a través de una articulación ficticia, formada por un ligamento anteroexterno (o trapezoide) y un posterointerno (o conoide), existiendo entrambos en el 50% de los casos una bursa.
- Escápulo-torácica: es una falsa articulación constituida por dos capas óseas (costillas y escápula) que no tienen un enfrentamiento directo entre sí. Dado que carece de ligamentos y estructuras articulares per sé, se mantiene por tensión sincrónica de trapecio, serratos anterior y posterior, romboides y elevador de la escápula. Participa en 60 de los 180° posibles de abducción del hombro.
- Articulación glenohumeral: principal actriz en la movilidad del hombro, de la se hablará en el resto del apartado. Toma parte los 120° restantes de la abducción. La glena se encontrará dispuesta con una anteversión de 30° respecto al plano coronal.

Centrándose en la articulación glenohumeral, está constituida por el enfrentamiento de la glena (parte más lateral de la escápula) y el húmero en su porción más proximal, formando entre sí una articulación de tipo enartrosis, es decir, constituida por una esfera enfrentada a una superficie cóncava. Este tipo de articulación permite un amplio espectro de movilidad en distintos ejes del espacio, pero, a cambio, es una articulación con tendencia a ser inestable [Kapandji, 2012; Hill, 2017]. Es por ello que precisa de un gran número de estabilizadores para llevar a cabo su función sin luxarse. Entre ellos destacan estabilizadores estáticos (ligamentos, labrum, disposición glenohumeral y presión negativa articular) y dinámicos (músculos del hombro), a destacar [Woon y Romeo, 2022]:

- Ligamentos coracohumeral y glenohumerales superior, medio e inferior: cada uno de ellos actúa de manera predominante en ciertas posiciones del hombro, siendo el más potente el ligamento glenohumeral inferior ([Figura 2](#)) ([Tabla 1](#)).

- Labrum glenoideo: reborde fibrocartilaginoso que aumenta la profundidad del encaje o “socket” glenoideo en un 50%, generando además una presión negativa en la cavidad. En él se insertan estructuras tan importantes como el tendón de la porción larga del bíceps o el ligamento glenohumeral inferior, siendo estos lugares zonas de debilidad donde se producen típicamente lesiones (SLAP o Bankart fibroso respectivamente). En aproximadamente el 15% de la población existen variantes fisiológicas del mismo en su zona anterior, a destacar el foramen sublabral, el ligamento glenohumeral medial cordonal o el complejo de Buford (labrum anterosuperior ausente con ligamento glenohumeral medial cordonal).

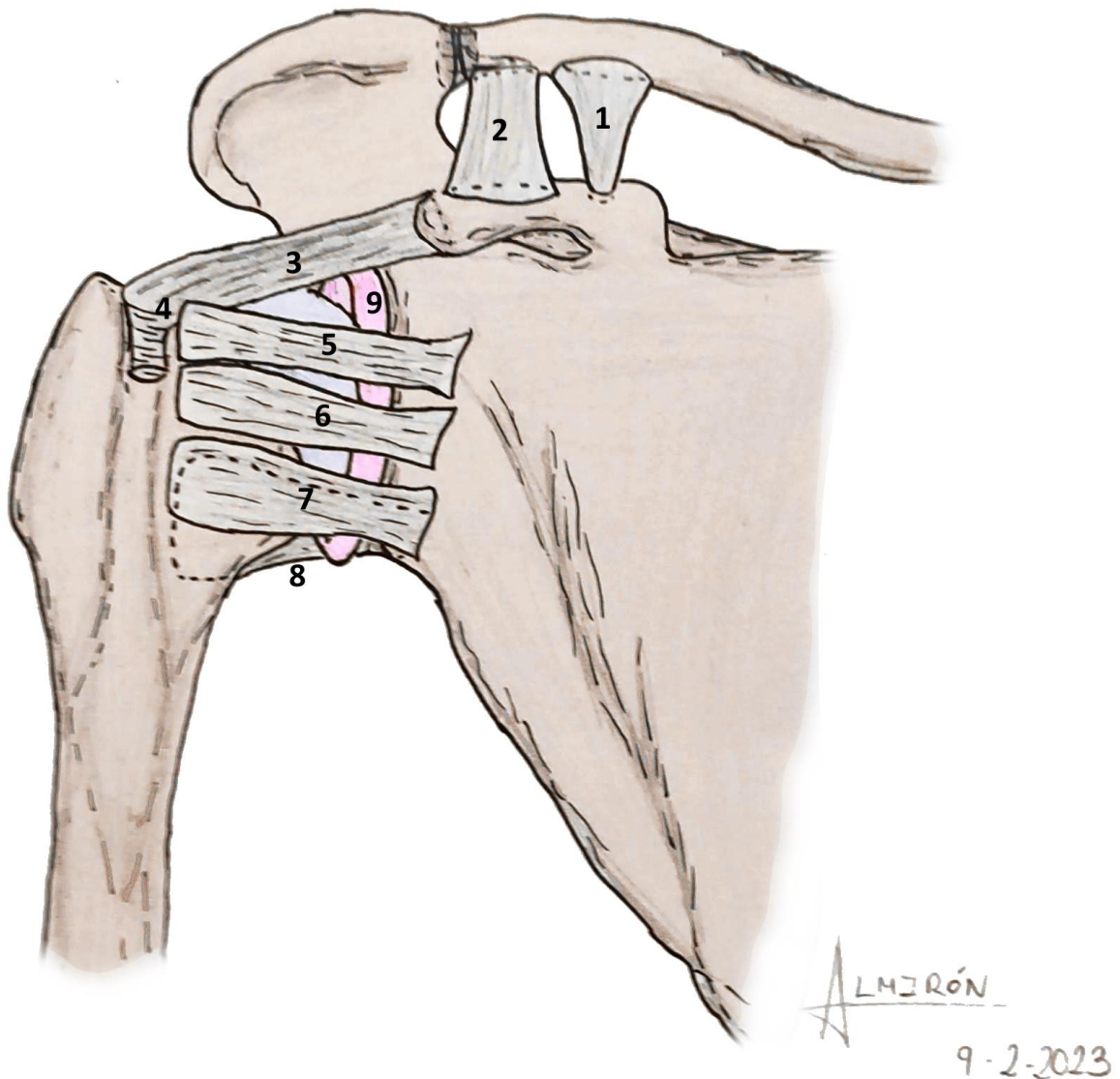


Figura 2. Principales estabilizadores estáticos del hombro. Se pueden apreciar el ligamento conoide (1), trapezoide (2), coracohumeral (3) y su expansión fibrosa que constituye el inicio de la correa bicipital (4), además de los ligamentos glenohumerales superior (5), medio (6) e inferior con su porción anterior (7) y posterior (8). Se aprecia el labrum (9) y cómo aumenta el “socket” glenohumeral.

<b>Estabilidad</b> <b>Posición</b>	<b>Anterior</b>	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>
<b>Aducción</b>		-Lig. G-H Superior -Lig Coracohumeral	
<b>Rotación Externa 45°</b> + <b>Abducción 45°</b>	Lig. G-H Medio		Lig. G-H Medio
<b>Rotación Externa 90°</b> + <b>Abducción 90°</b>	Lig G-H Inferior, fascículo anterior		Lig G-H Inferior, fascículo posterior
<b>Rotación Interna</b> + <b>Flexión (anterior)</b> + <b>Abducción (45-180°)</b>			-Lig. G-H Superior -Lig Coracohumeral

Tabla 1. Principales ligamentos estabilizadores glenohumerales dependiendo de la posición del hombro. Filas: Posición del hombro. Columnas: Función de estabilización primordial que realizan. Por ejemplo, un estabilizador anterior evitará que se produzca una luxación anterior. G-H = Gleno-Humeral

- Cápsula articular: destacando la zona posterior, de escaso grosor, y la zona anterior o intervalo rotador, delimitada por diversos músculos y constituida por ligamentos de la zona anterior.
- Manguito rotador: conjunto muscular constituido por supraespinoso, infraespinoso, subescapular y redondo menor, que van desde escápula hacia húmero proximal y ejercen una función de compresión entre ambas estructuras. Cada uno de ellos, a su vez, ejerce una acción eminentemente de rotación interna (subescapular), externa (infraespinoso y redondo menor) y abducción de los primeros 15° (supraespinoso) (Figura 3). Este grupo muscular funciona de manera conjunta como un sistema de cable y soporte, como se describe en la teoría del puente colgante del manguito rotador, que permite entender cómo se comportan las roturas del mismo y sus reparaciones [Burkhart, 1993] (Figura 4).

- Porción larga del bíceps: depresor de la cabeza humeral que se origina en la zona superior del labrum y discurre a través de la corredera bicipital para abandonar el hombro, estando en íntima relación con el ligamento glenohumeral superior y el músculo subescapular

Superficialmente a todas las estructuras mencionadas queda el deltoides, un músculo trifascicular que participa en los movimientos de flexoextensión del hombro y, sobretodo, abducción (actúa conjuntamente con el supraespinoso, siendo el deltoides el músculo predominante a partir de los 15°).

El húmero proximal es la estructura ósea primordial de la presente tesis y cuya anatomía se procede a describir detalladamente a continuación. Es un hueso largo, par y asimétrico, cuya extremidad superior es una esfera ligeramente aplanada en el eje anteroposterior, estando su tercio superomedial recubierto de cartílago articular, delimitando éste el cuello anatómico del húmero. Lateralmente a la zona cartilaginosa se aprecian dos eminencias óseas. Por un lado, el troquín se presenta en la zona anteromedial de la cabeza humeral, siendo una tuberosidad de pequeño tamaño donde se insertará el subescapular. Por otra parte, el troquíter se presenta en una disposición más posterolateral, siendo de mayor tamaño e insertándose en él el resto de músculos del manguito rotador. Entrambas estructuras se aprecia un canal liso conocido como corredera bicipital, que albergará al tendón de la porción larga del bíceps. Esta corredera presenta dos crestas, una anterior en la cual se inserta el pectoral mayor y una posterior en la cual se insertarán el dorsal ancho y el redondo mayor. Inferiormente a las mencionadas tuberosidades, y de una forma mal delimitada, se encuentra el llamado cuello quirúrgico y, lateralmente al mismo, estará la llamada V deltoidea, que demarca el límite inferior del húmero proximal, donde se inserta el músculo homónimo. La angulación típica entre diáfisis y cabeza humeral es de 135° [Testut y Latarjet, 1996; Triplet, 2022] ([Figura 5](#)).

El húmero, al igual que el resto de huesos del cuerpo, tiene una red trabecular en su interior que se distribuye de forma acorde a las cargas, existiendo zonas óseas con mayor o menor resistencia a las fuerzas. El cóncavo humeral es la zona de mayor resistencia por su disposición trabecular, y se encuentra en la zona medial y proximal, inmediatamente caudal a la cabeza cartilaginosa del húmero, formando parte de la llamada bisagra medial del húmero. Abrazándolo encontramos las arterias circunflejas humerales anterior y posterior, que son las principales encargadas de aportar la vascularización al húmero proximal. Es por ello que se consideran factores de buen pronóstico en las fracturas de húmero proximal que la cabeza incluya al menos 8mm de cóncavo o que la bisagra medial se encuentre preservada, ya que estos hechos se asocian típicamente a una vascularización de la cabeza indemne, lo cual hace que el riesgo de fracaso de una osteosíntesis secundario a una necrosis avascular de la cabeza humeral sea menor [Testut y Latarjet, 1996; Triplet, 2022] ([Figura 5](#)).

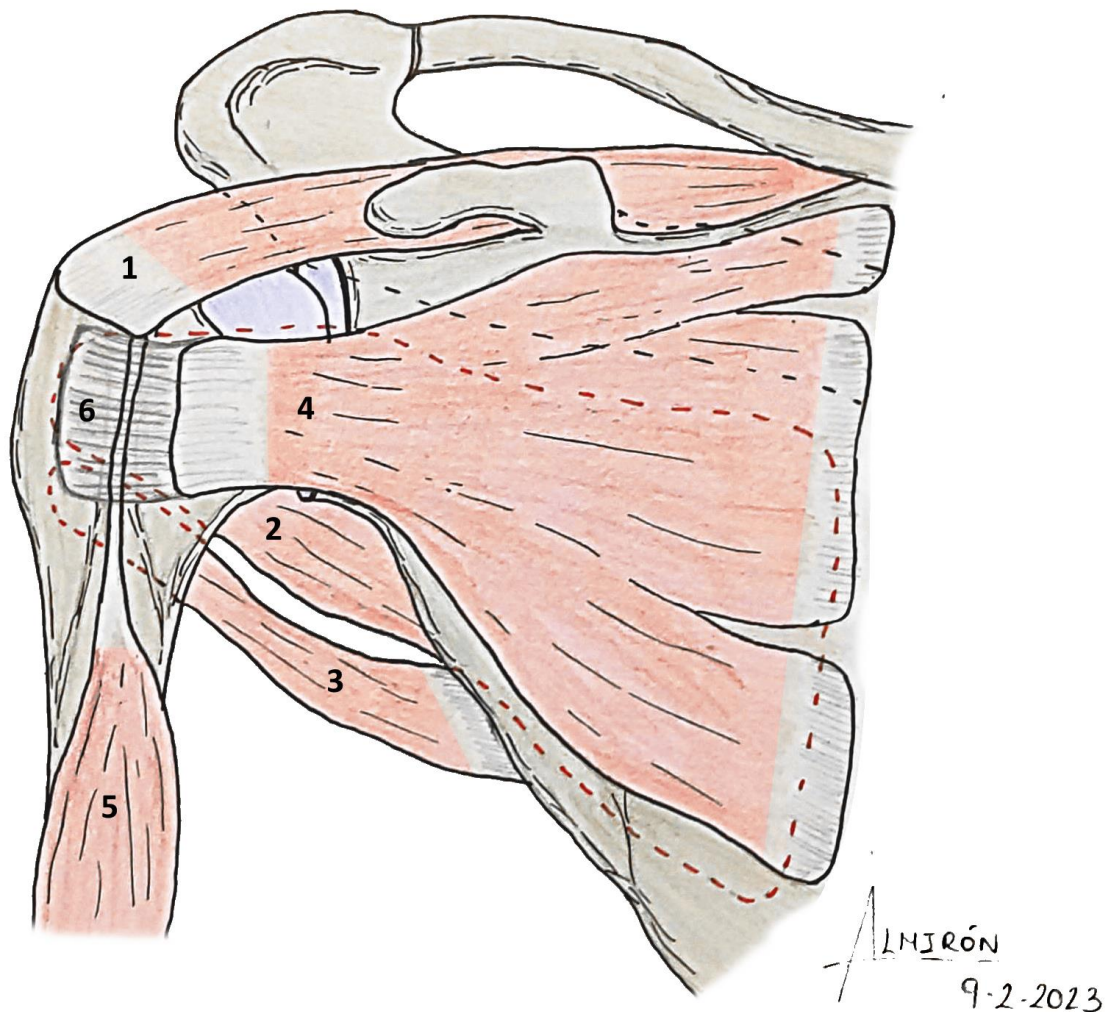


Figura 3. Principales músculos implicados en la estabilidad del hombro: supraespinoso (1), infraespinoso (2), redondo menor (3) y subescapular (4) como constituyentes del manguito rotador y porción larga del bíceps (5). Todos ellos están cubiertos por el deltoides, que participa principalmente en la abducción del hombro. Se aprecia la expansión fibrosa derivada del subescapular que abraza al tendón del bíceps en la corredera (6).

Figura 4. Diagrama de teoría del puente colgante de Burkhart, que determina el paradigma de las roturas del manguito rotador y el funcionamiento de la reparación en doble hilera como técnica más recomendada actualmente en la cirugía de manguito con grandes roturas. Las roturas del manguito que afectan sólo a la "zona de cable" (supraespinoso en su zona media) no alteran la funcionalidad del puente, pero si la rotura llega hasta las zonas de los pilares (zonas de unión de supraespinoso con el subescapular por anterior o con el infraespinoso por posterior) el puente se desequilibrará, generando una impotencia funcional.



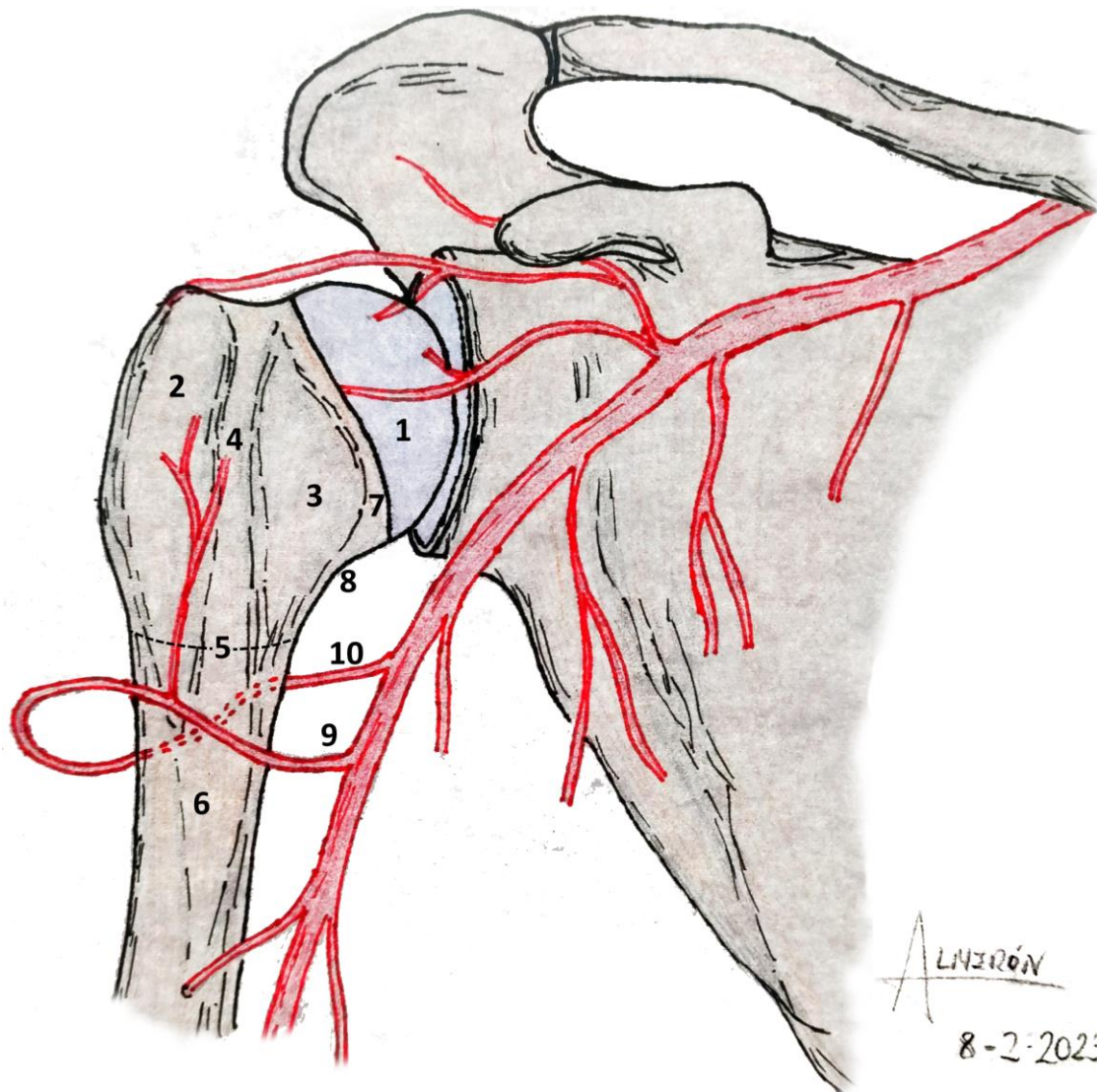


Figura 5. Osteología y vascularización del húmero proximal. Se puede apreciar como principales estructuras la cabeza cartilaginosa (1), troquíter (2), troquíin (3) y corredera bicipital (4). El límite inferior del húmero proximal será el cuello quirúrgico (5), mal delimitado y que lo separa de la diáfisis (6). No debe ser confundido con el cuello anatómico (7). La zona más resistente será el cálcar (8) que es la zona medial del húmero por donde discurren las arterias circunflejas humerales anterior (9) y posterior (10), principales encargadas de la irrigación del húmero proximal.

Es necesario, por último, hablar de la inervación de la zona que nos ocupa, en tanto que jugará un rol fundamental en el tratamiento quirúrgico de las fracturas de húmero proximal. Justamente anterior a la articulación glenohumeral discurren una serie de ramas nerviosas que se dirigen hacia la musculatura del miembro superior y proceden de la interconexión de las raíces cervicales C5 a T1 en el llamado plexo braquial. Algunas ramas nerviosas destacables desde el punto de vista de la cirugía del hombro son:

- Nervio supraescapular: que abandona de forma temprana el plexo a nivel del tronco superior, y se encarga de inervar a los músculos supraespinoso e infraespinoso, determinantes en la viabilidad del hombro intervenido. Es relativamente frecuente encontrar compresiones del mismo a nivel del foramen o escotadura supraescapular (variable según el paciente), lo cual da lugar a dolor e impotencia funcional de los músculos mencionados, generando una clínica similar a una tendinopatía del manguito rotador, pudiéndose solucionar el mencionado cuadro compresivo mediante liberación del nervio por técnicas quirúrgicas o de hidrodisección.
- Nervio axilar o circunflejo: procedente del fascículo posterior del plexo, pasando por debajo de la cabeza anatómica del húmero a través del espacio cuadrilátero muscular, y envolviéndola a lo largo de toda su circunferencia. Es la rama encargada de inervar el deltoides, determinante en la funcionalidad de la prótesis invertida de hombro. En la zona lateral del hombro, discurre de manera horizontal a unos 5-7cm caudal al acromion, siendo considerada esta zona como prohibida en las cirugías de hombro, como se verá en próximos apartados.
- Nervio musculocutáneo: discurre justamente adyacente al tendón conjunto (porción corta del bíceps, pectoral menor y coracobraquial), inervando a dichos músculos parcialmente y dando sensibilidad en zonas del antebrazo. Es un nervio muy expuesto a lesiones en el abordaje anterior de hombro, especialmente a causa de tracciones sostenidas de separadores sobre el tendón conjunto. Por tanto, es una posible complicación de las cirugías de hombro la neurapraxia, normalmente transitoria, de este nervio a nivel de su paso por el músculo coracobraquial.
- Nervios subescapulares (superior e inferior): encargados de inervar al músculo homónimo, y surgen del fascículo posterior del plexo. En general tienen poca significación anatómica o patológica en la cirugía de hombro, aunque su papel es primordial en la funcionalidad del hombro sano.
- Nervio radial: siendo la rama principal del fascículo posterior, que envuelve posteriormente al húmero y que, usualmente, se ve lesionado en traumatismos del mismo, pudiéndose ver interpuesto entre los fragmentos de las fracturas de diáfisis humeral o de fracturas de húmero proximal de trazo descendente largo. Puede ser dañado en las cirugías, siendo un nervio con gran tendencia a la neurapraxia. Se encarga de inervar a los extensores antebraquiales y dar sensibilidad a la zona dorsal de mano y antebrazo, entre otras funciones. Una neurapraxia prequirúrgica del mismo es una indicación absoluta de apertura del foco de fractura y exploración para descartar que el nervio se encuentre interpuesto entre los fragmentos, contraindicando la cirugía mínimamente invasiva (MIS o Minimally Invasive Surgery).

Además de los mencionados, existe todo un entramado de nervios que constituyen el plexo braquio-axilar, encontrándose en íntima relación con la articulación que nos ocupa tanto de forma anatómica como funcional, y que se pueden apreciar en la [Figura 6](#).

Las fracturas de húmero proximal se asocian a lesiones de este plexo, especialmente aquellas con un desplazamiento hacia medial de la diáfisis >40%, siendo imprescindible una buena exploración neurológica prequirúrgica del plexo en estas fracturas [Couch et al., 2021].

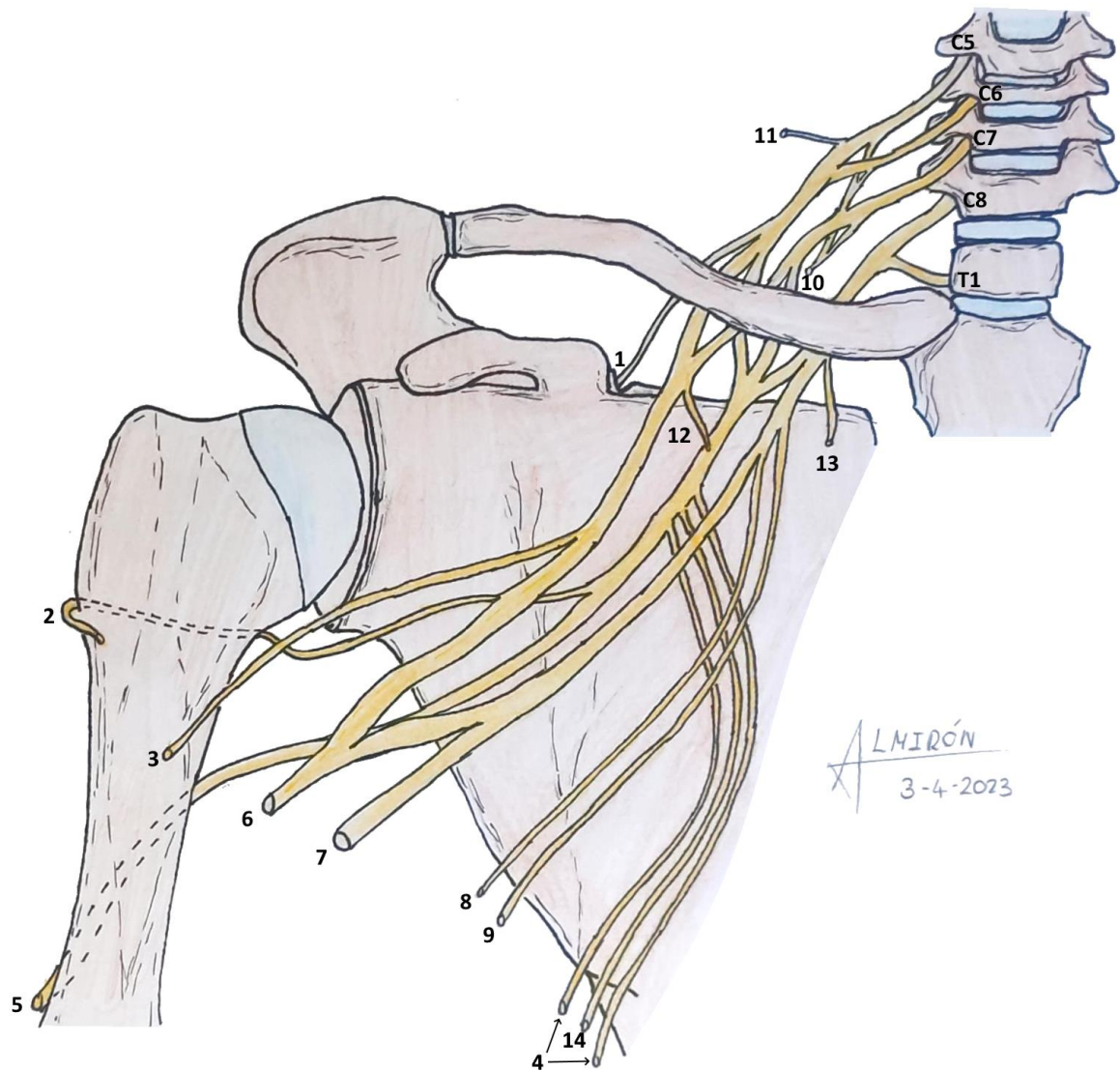


Figura 6. Plexo braquial/axilar y ramas terminales. En la imagen se puede ver los nervios supraescapular (1), axilar o circunflejo (2), musculocutáneo (3), subescapulares superior e inferior (4) y radial (5), determinantes en las patologías del hombro y su tratamiento. Otras ramas terminales de este plexo son los nervios mediano (6), cubital (7), cutáneo medial del antebrazo (8) y del brazo (9), torácico largo (10), dorsal de la escápula (11), pectoral lateral (12), primer intercostal (13) y pectoral medial (14).

Todos los factores anatómicos relatados en el presente apartado tendrán su trascendencia en la decisión quirúrgica sobre las fracturas de húmero proximal y otras cirugías relacionadas con el hombro. Existen otros múltiples factores a tener en cuenta, como la viabilidad del deltoides, la funcionalidad neurológica de la zona o el equilibrio entre los músculos mencionados y los periescapulares (dorsal ancho, trapecio, serratos...), de lo cual se hablará en los sucesivos apartados según proceda.

## **1.2.2 Epidemiología de las fracturas de húmero proximal**

Las fracturas de húmero proximal son las séptimas más frecuentes en adultos y las terceras en mayores de 65 años, sólo por detrás de las fracturas de fémur proximal y muñeca, suponiendo un 5.7% de las fracturas diagnosticadas. El hecho de ser fracturas osteoporóticas hace que exista un aumento de la incidencia proporcional al envejecimiento poblacional, lo cual supone en nuestra sociedad actual un problema socioeconómico tanto por el coste que supone el tratamiento per sé como por la gran comorbilidad y dependencia asociadas a las mismas [Roux et al., 2012].

Un claro ejemplo de esta tendencia ascendente lo encontramos en el Registro Sueco sobre sanidad nacional, en el cual se puede apreciar un aumento progresivo de la incidencia de estas fracturas de 92.7 por cada 100.000 personas en el año 2001 hasta las 121.9 por cada 100.000 habitantes en el año 2012, lo cual supone un crecimiento total de un 31% en dicho periodo. Según la población estudiada, existe una gran variabilidad en estos números; por ejemplo, en un estudio sobre el registro nacional germano se apreció un incremento entre los años 2007 y 2016 de 65.2 hasta 74.2 casos por 100.000 habitantes, lo cual supone un incremento del 14.3% [Sumrein et al., 2017; Klug et al., 2019].

Por tanto, la incidencia es muy variable según la población, hablándose en algunos estudios de valores que oscilan entre los 10 y los 300 casos por cada 100.000 habitantes dependiendo de la población estudiada. Si bien, lo que queda claro en todos los estudios es que se aprecia una tendencia ascendente en la incidencia de esta patología [Huttunen et al., 2012].

Aunque en la mayoría de estudios dicha tendencia se atribuye principalmente al envejecimiento poblacional, existen otros factores que se deberían considerar determinantes en el futuro de cara al estudio epidemiológico de estas fracturas, como son las horas de sol y otros factores demográficos, probablemente en relación con los déficits de vitamina D y alteraciones del metabolismo óseo. Se ha demostrado que la incidencia de esta patología es mayor conforme más al norte de Europa nos encontremos [Roux et al., 2012].

También cabría tener en cuenta el aumento de la tendencia poblacional a la obesidad, ya que este factor ha mostrado una correlación positiva con la incidencia de fracturas de húmero proximal en mujeres [Gnudi et al., 2009; Prieto-Alhambra et al., 2012].

Otro factor considerar es la tendencia a fracturas por impactos de alta energía. Aunque el aumento de deportes extremos y ciertas actitudes de riesgo en la población podría suponer un aumento de la incidencia de estas fracturas en pacientes jóvenes, otros logros como el aumento de la seguridad vial podrían influir en una disminución de las mismas. Ante la ausencia de estudios que disgreguen la tendencia poblacional por edades, sacar conclusiones al respecto es complejo. Podría ser útil el desarrollo de nuevos estudios al respecto centrados en la evolución de la incidencia de estas fracturas en pacientes jóvenes y en población no osteoporótica.

### I.2.3 Importancia socioeconómica del problema

Las fracturas de húmero proximal causan elevados costes en los sistemas sanitarios de todo el mundo. Por ejemplo, se realizó una estimación en Países Bajos que determinó que el coste total, sumando gastos directos e indirectos, de las fracturas de húmero proximal en dicho país entre los años 1986 y 2012 fue de aproximadamente 48,5 millones de euros [Mahabier et al., 2015].

La preocupación desde el punto de vista económico no radica simplemente en el número de fracturas y el precio a pagar por ellas, sino también en el hecho de que diferentes tratamientos pueden suponer costes radicalmente diferentes y, en ocasiones, con una efectividad muy similar, que hace que la balanza de costo-efectividad y costo-eficiencia se decante en ocasiones hacia alternativas de tratamiento menos agresivas.

En números, los costes directos e indirectos medios que supone una fractura de húmero proximal van desde los \$1,932 del tratamiento conservador hasta los \$16,515 de la prótesis invertida de hombro, habiendo alternativas intermedias como la hemiartroplastia (\$9,348) o la osteosíntesis con placas (\$6,745) [Levy et al., 2017]. Otros autores han arrojado valores de coste consonantes a los presentados en dicho estudio [Stolberg-Stolberg et al., 2021].

En fracturas de cuello humeral se ha apreciado que el tratamiento conservador puede ser una alternativa costo-efectiva en el manejo de estas fracturas [Handoll et al., 2015]. No obstante, existen otros estudios que defienden que, en pacientes ancianos, la costo-efectividad medida en QALY (Quality-Adjusted Life Years) no muestra diferencias entre paciente intervenidos y no intervenidos [Fjalestad et al., 2010]. Es más, incluso en los últimos tiempos han surgido estudios defendiendo que la máxima costo-efectividad la aporta la prótesis invertida de hombro en el caso de fracturas complejas en pacientes ancianos [Corbacho et al., 2016; Osterhoff et al., 2017; Abdel Khalik et al., 2022]. Otros autores argumentan que la osteosíntesis es una alternativa más costo-efectiva que la hemiartroplastia en pacientes correctamente seleccionados [Thorsness et al., 2016]. Por último, existen trabajos que defienden que en pacientes ancianos no existen diferencias respecto a la costo-utilidad entre realizar osteosíntesis con placas y tornillos e implantar una prótesis invertida en estas fracturas [Bjørndal et al., 2022].

En este contexto tan complejo y con tantas conclusiones dispares, es necesario comprender que no todas las fracturas ni, en general, todos los pacientes son iguales, y que las características de cada caso harán que el cirujano tome una decisión terapéutica ajustada al paciente basándose en la mejor evidencia y experiencia posible de forma individualizada.

De este modo, una fractura multifragmentaria en un paciente anciano será una fractura que supondrá un coste mucho más elevado per sé que otras fracturas de húmero proximal más simples, y la cual podrá tratarse con alternativas que irán desde el tratamiento conservador hasta la artroplastia, sin ser ninguna de las opciones disponibles mejor que otra necesariamente.

En esencia, cada fractura tendrá un coste proporcional a la dificultad de la misma y del paciente que la porta, debiéndose individualizar el tratamiento. Es justamente en este punto donde radica la importancia de realizar una clasificación lo más correcta posible de la fractura, ya que esto permitirá al cirujano tomar la mejor decisión posible tanto de cara a los costes como a la efectividad del tratamiento. La costo-efectividad del proceso deberá considerar los gastos, recursos disponibles, impacto socioeconómico y tiempo invertido en el tratamiento del paciente y en su recuperación [Neuman y Sanders, 2017]

Es decir, no se puede olvidar que, en este tipo de fracturas, dando por supuesto que se busca el mejor estado de salud para el paciente, aparecerán tantos costes directos (cirugía, hospitalización, fármacos, ambulancias...) como indirectos (tiempo de recuperación, reincorporación al trabajo, pérdida de eficiencia en la empresa, subsidios posteriores...), debiéndose considerar ambos dentro de los futuros estudios socioeconómicos.

Por supuesto, otro factor determinante en el coste de estos procedimientos quirúrgicos es la tasa de complicaciones. Se han publicado estudios que establecen que las complicaciones postquirúrgicas de este tipo de fracturas suponen hasta un 17% del coste total del tratamiento quirúrgico de las fracturas de húmero proximal, debiéndose desarrollar estrategias de prevención de complicaciones para ahorrar este sobrecoste [Dauwe et al., 2020].

También es imprescindible tener en cuenta la experiencia del cirujano, habiéndose demostrado que un cirujano experimentado que realice al menos 20 artroplastias de hombro al año es capaz de ahorrar hasta \$1800 por paciente intervenido al sistema sanitario en comparación con un cirujano con poca experiencia [Jain et al., 2013].

Dada la probable incidencia creciente de estas fracturas y la gran variabilidad en el rango de costos del tratamiento, es crítico contar con métodos efectivos para determinar el tratamiento apropiado. Comúnmente, el número de fragmentos y su desplazamiento son dos variables relevantes para las decisiones de tratamiento de las fracturas de húmero proximal. Sin embargo, el cómo se relacionan exactamente estas variables con la selección del tratamiento sigue siendo controvertido y existe una heterogeneidad significativa sobre qué peso dar al patrón de fractura. En general, se acepta que las fracturas con desplazamientos mínimos se tratan de forma conservadora, mientras que las fracturas desplazadas, conminutas o anguladas suelen tratarse con cirugía [Schumaier y Grawe, 2018].

En conclusión: la elección del tratamiento idóneo y con mejor balance de costo-efectividad dependerá del paciente y sus características y las de su fractura, y para poder alcanzar dicho tratamiento será imprescindible tener en nuestra mano el conocimiento más completo posible del caso. Probablemente, parte del ahorro que supone la experiencia del cirujano radique en esta buena toma de decisiones. Es por ello que este trabajo ensalza la necesidad de clasificar correctamente las fracturas de húmero proximal, ya que una buena clasificación puede hacer que cambie la elección terapéutica y conducirnos a decisiones con mejor balance de costo-efectividad.

## 1.2.4 Clínica y diagnóstico de las fracturas de húmero proximal

Las fracturas de húmero proximal, al igual que la mayoría de fracturas, vienen causadas usualmente por un evento traumático que genera fuerzas de sollicitación sobre el hueso que son superiores a su resistencia. En general, estas fracturas suelen venir propiciadas por una caída directa sobre el brazo en cuestión.

En pacientes jóvenes, el impacto recibido suele ser de alta energía. Sin embargo, en la población anciana, en la cual es más frecuente esta patología, es típico que se produzcan por traumatismos de baja energía sobre un hueso débil (fracturas patológicas, es decir, producidas sobre un hueso con resistencia mermada, siendo la principal causa de fractura patológica la osteoporosis primaria).

Clínicamente cursarán con dolor e impotencia funcional del hombro afectado, pudiendo manifestar en ocasiones una deformidad que puede ser aún mayor en el caso de presentar una luxación asociada.

Es crucial determinar el estado neurovascular del miembro afecto, ya que estas fracturas se pueden asociar a daños en estructuras vasculares o nerviosas adyacentes al hombro, ya descritas en apartados previos.

En las fases posteriores, puede aparecer un hematoma difuso en brazo y tórax, conocido como hematoma de Hennequin. Pueden aparecer también de manera diferida otras complicaciones neurovasculares e incluso anemia o síndrome compartimental (excepcionales).

La confirmación diagnóstica se obtiene mediante radiografías, siendo recomendable realizar al menos proyecciones en anteroposterior pura de Grashey, en Y escapular y axilar, aunque hay múltiples proyecciones que se pueden añadir para complementar el estudio inicial en el departamento de urgencias. En las radiografías, además de la fractura, se puede apreciar luxaciones reales o pseudoluxaciones caudales generadas por el hematoma intracapsular sumado a la atonía muscular. La exploración es esencial, aunque mediante una teleconsulta radiológica puede ser suficiente para diagnosticar una fractura [Pamuk et al., 2022].

El estudio puede ser complementado con otras dos pruebas: por una parte, la tomografía computarizada es una técnica de suma relevancia en la planificación prequirúrgica, ya que permite conocer el número de fragmentos y su conformación exacta, así como medir con mejor exactitud el desplazamiento, entre otros. Además, esta técnica permite realizar reconstrucciones tridimensionales procesadas gráficamente, siendo la antesala de los modelos reproducibles por impresión 3D o realidad virtual y, de este modo, la prueba príncips en los fundamentos de esta tesis. Se debe realizar en cualquier fractura con daño en el cóncavo [Campochiaro et al., 2015].

Por otra parte, la RMN puede ser útil para descartar roturas asociadas del manguito rotador (recuperación más lenta) o para descartar osteonecrosis previa, aunque es una prueba con escaso valor en esta patología [Pitcher et al., 2019; Triplet, 2022]

## I.2.5 Clasificación de las fracturas de húmero proximal

Las fracturas de húmero proximal han sido clasificadas históricamente de maneras muy diversas, y en la actualidad se siguen aceptando como válidas diversas clasificaciones que se desarrollará a lo largo de este apartado.

Existe una máxima en medicina que es que cuando existen varias alternativas a un problema, en líneas generales, quiere decir que ninguna de ellas es perfecta, ya que no hay ninguna capaz de imponerse sobre las demás como el estándar de calidad. Esto es lo que sucede en el caso de las clasificaciones de húmero proximal.

La primera clasificación como tal de las fracturas de húmero proximal fue la diseñada por Neer y publicada en 1970, recibiendo el nombre del autor y siendo aún a día de hoy la más extendida, probablemente no sólo por ser la pionera, sino por su simplicidad ([Figura 7](#)).

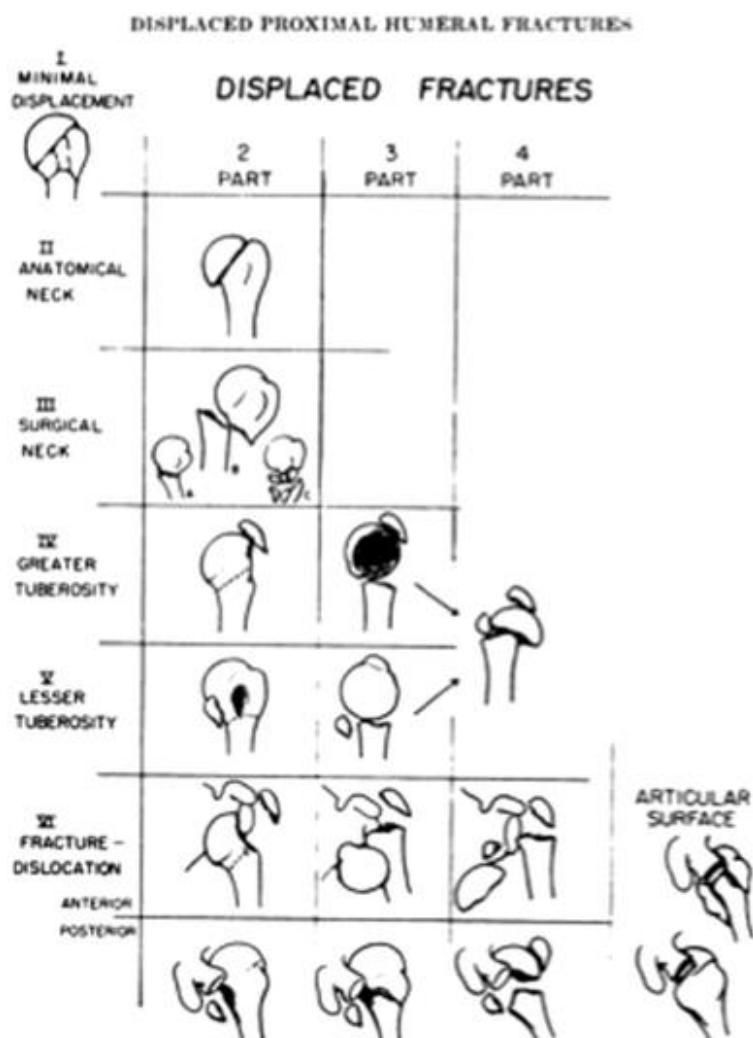


Figura 7. Clasificación original de fracturas de húmero proximal planteada por CS Neer II. (Reutilizada de Neer CS 2nd. *Displaced proximal humeral fractures. I. Classification and evaluation*. *J Bone Joint Surg Am.* 1970;52:1077-1089. License permission provided by Wolters Kluwer Health Inc. with license number 5485820788451).

El uso de esta clasificación sigue vigente hoy día de manera extensa, aunque diversos autores han propuesto modificaciones de la misma que podrían otorgar un mejor valor pronóstico respecto a la tasa de necrosis de la cabeza y los resultados funcionales post-fractura [Matsumura et al., 2020].

Antes de la clasificación de Neer, Codman describió por primera vez en 1932 algunos patrones típicos de las fracturas de húmero proximal y su relación con la bursa subacromial y el mecanismo de ruptura en relación con otras estructuras óseas del hombro, publicando esta información en su libro en 1934. Basándose en los trazos, describió que las fracturas de la zona proximal humeral constaban usualmente de 4 fragmentos, que inicialmente determinó en función de la mencionada bursa, describiendo así un amplio espectro de patrones de fractura en función de los trazos entre dichos fragmentos [Codman, 1934] (Figura 8). En resumen, Codman identificó cuatro fragmentos principales: cabeza cartilaginosa, troquíter, troquín y diáfisis.

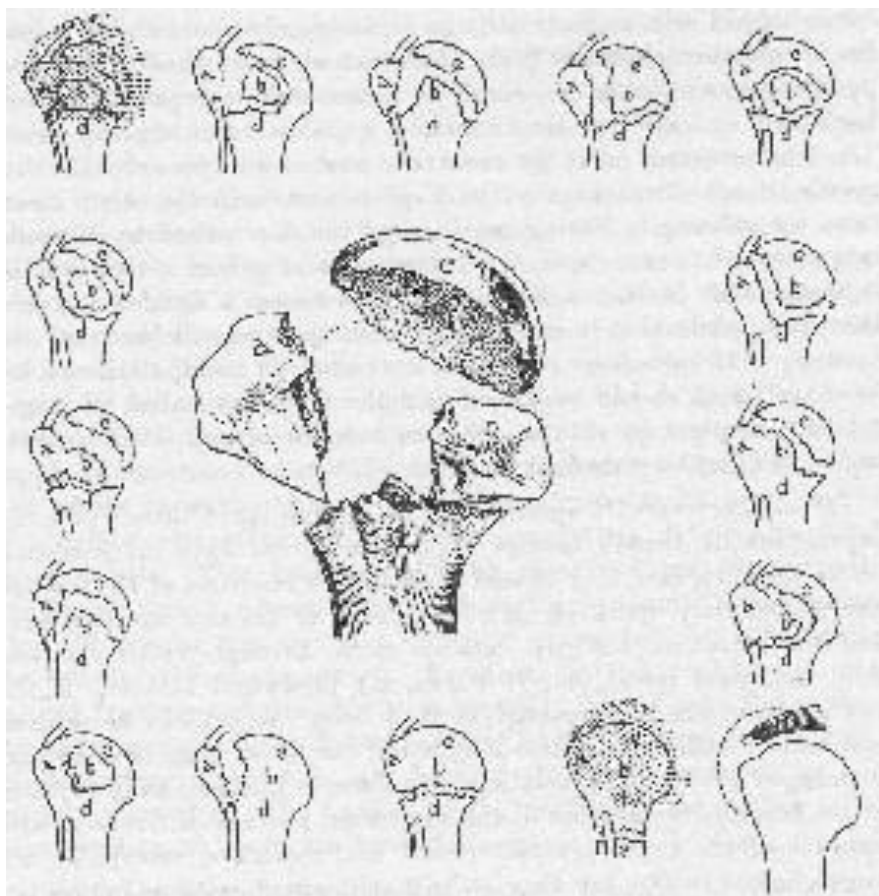


Figura 8. Patrones de fractura descritos por Ernest Amory Codman en 1932. Imagen tomada de su libro *The Shoulder: Rupture of the Supraspinatus Tendon and Other Lesions in or about the Subacromial Bursa*, Capítulo X. Recurso abierto disponible en <https://www.shoulderdoc.co.uk/article/924>

Años después, basándose en el sistema de Codman, Hertel idea una clasificación conocida como HGLS (del inglés Head – Greater tuberosity – Lesser tuberosity – Shaft, haciendo alusión a los cuatro fragmentos descritos por Codman). Este sistema de clasificación, también

conocido como sistema de Hertel o de LEGO, se basó en un sistema dicotómico de cinco preguntas con respuesta sí/no, a mencionar [Hertel et al., 2004]:

1. ¿Existe una fractura entre la tuberosidad mayor (troquíter) y la cabeza?
2. ¿Existe una fractura entre la tuberosidad mayor (troquíter) y la diáfisis?
3. ¿Existe una fractura entre la tuberosidad menor (troquíen) y la cabeza?
4. ¿Existe una fractura entre la tuberosidad menor (troquíen) y la diáfisis?
5. ¿Existe una fractura entre la tuberosidad mayor (troquíter) y la menor (troquíen)?

Resultado de ello se obtienen un total de 12 fragmentos que Hertel plasmó realizando una analogía entre las partes de la cabeza del húmero y piezas de LEGO de distinto color ([Figura 9](#)). Este autor planteó, además, otra serie de preguntas secundarias con valor pronóstico para la supervivencia de la cabeza humeral en base a su riesgo de osteonecrosis avascular, destacando estas siete preguntas accesorias que complementan a las cinco previas:

6. ¿Qué longitud tiene la bisagra posteromedial de la cabeza?
7. ¿Cuánto desplazamiento hay entre la diáfisis y el macizo de la cabeza?
8. ¿Cuánto se han desplazado las tuberosidades?
9. ¿Existe angulación de la cabeza? ¿Cuánta angulación?
10. ¿Hay luxación glenohumeral?
11. ¿Existe fractura por impronta en la cabeza? (Lesiones de Hills-Sachs y McLaughlin)
12. ¿Existe un Split o separación de la cabeza con afección de >20% de la misma?

Todas las respuestas dadas a dichas preguntas tendrán valor pronóstico en la supervivencia de la cabeza humeral en base al riesgo de isquemia de la misma y, por ende, serán determinantes en la elección del tratamiento más apropiado para el paciente. Así, una fractura con mala alineación y un gran número de factores de riesgo de necrosis decantará la balanza hacia las intervenciones protésicas en detrimento de las técnicas de osteosíntesis.

Múltiples autores han ensalzado la utilidad de esta clasificación gracias a su simplicidad, existiendo distintos trabajos que le otorgan una elevada concordancia inter e intraobservador para distintas pruebas diagnósticas, especialmente en el uso de la tomografía computarizada, con resultados incluso superiores a los de las otras clasificaciones de fractura de húmero proximal convencionalmente utilizadas en el día a día (Sukthankar et al., 2013; Iordens et al., 2016). No obstante, por otra parte hay trabajos que demuestran que, aún en manos de traumatólogos expertos, esta clasificación presenta concordancias bajas y que, por ello, el concepto de tratamiento basado en la clasificación de la fractura mediante este sistema debería ser revisado [Chelli et al., 2022].

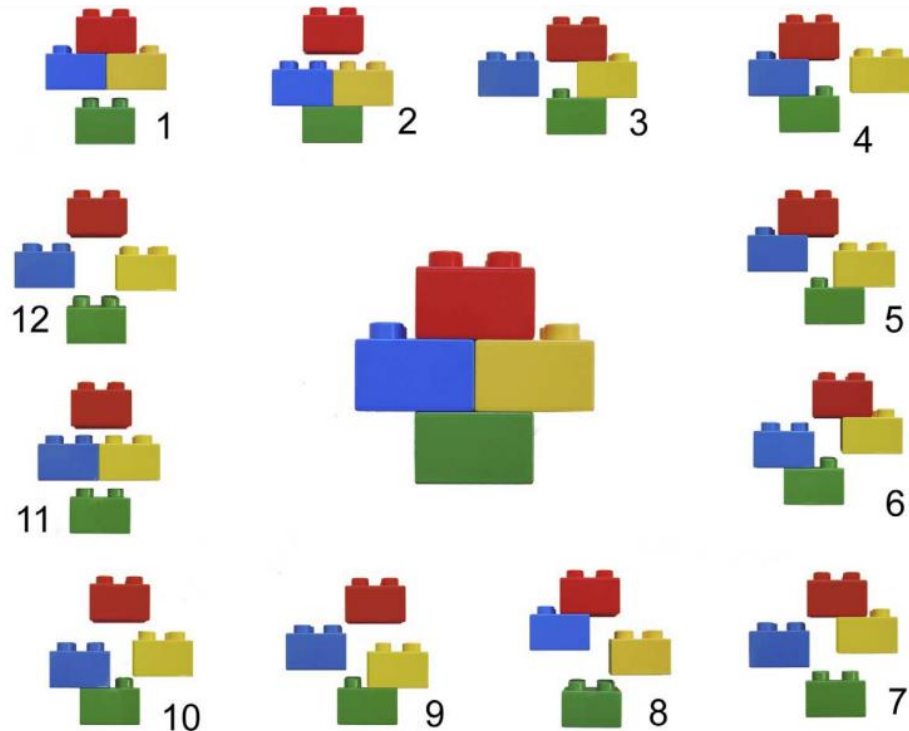


Figura 9. Clasificación descrita por Hertel basado en el sistema de piezas de LEGO y en los patrones descritos por Codman. Rojo = Head, Amarillo = Greater, Azul = Lesser, Verde = Shaft. (Reutilizada de Hertel R, Hempfing A, Stiehler M, Leunig M (2004) Predictors of humeral head ischemia after intracapsular fracture of the proximal humerus. *Journal of shoulder and elbow surgery United States* 13:427–433. License permission provided by Elsevier. with license number 5507161281038).

Además de las ya mencionadas, cabe hablar de la clasificación de la AO-Surgery Reference Foundation (*Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen/Orthopaedic Trauma Foundation*). Esta fundación surge como una organización sin ánimo de lucro en 1958 en Suiza con la idea de unificar criterios en base al diagnóstico de las fracturas y su tratamiento más oportuno. Así, clasifica las fracturas de todas las partes del cuerpo en función de sus patrones más frecuentes y propone tratamientos para los mismos, incluyendo las fracturas de húmero proximal.

Esta clasificación se caracteriza por su nomenclatura alfanumérica, nombrándose las fracturas con un patrón: hueso afectado (1-3) y segmento afectado (1-3) – Zona de afección articular/diafisaria (A-C), Tipo de afección articular/patrón (1-3). Si bien, el húmero es una excepción en la misma, ya que el tercer criterio cambia, siendo A = extraarticular unifocal, B = extraarticular bifocal y C = Articular. Para una mejor comprensión, se adjunta la clasificación de AO-OTA (*Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen / Orthopaedic Trauma Foundation*) ([Figura 10](#)).

Dicha complejidad en cuanto a la nomenclatura, sumada al amplio patrón descriptivo de la misma, ha sido motivo de crítica de esta clasificación, habiendo estudios que demuestran menor concordancia inter e intraobservador que con otras clasificaciones [Stoddart et al., 2020].

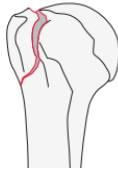
**11A**

**Type:** Humerus, proximal end segment, **extraarticular, unifocal, 2-part fracture** 11A

**Group:** Humerus, proximal end segment, extraarticular, unifocal, 2-part, **tuberosity fracture** 11A1

**Subgroups:**

**Greater tuberosity fracture**  
11A1.1



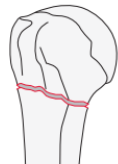
**Lesser tuberosity fracture**  
11A1.2



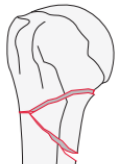
**Group:** Humerus, proximal end segment, extraarticular, unifocal, 2-part, **surgical neck fracture** 11A2

**Subgroups:**

**Simple fracture**  
11A2.1



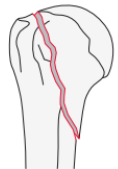
**Wedge fracture**  
11A2.2



**Multifragmentary fracture**  
11A2.3



**Group:** Humerus, proximal end segment, unifocal, 2-part, **extraarticular vertical fracture** 11A3



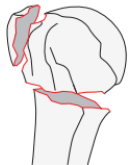
**11B**

**Type:** Humerus, proximal end segment, **extraarticular, bifocal, 3-part fracture** 11B

**Group:** Humerus, proximal end segment, extraarticular, bifocal, 3-part, **surgical neck fracture** 11B1

**Subgroups:**

**With greater tuberosity fracture**  
11B1.1\*



**With lesser tuberosity fracture**  
11B1.2\*



\*Qualifications:  
u Intact wedge  
v Fragmentary wedge

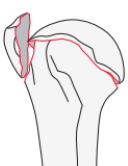
**11C**

**Type:** Humerus, proximal end segment, **articular or 4-part fracture** 11C

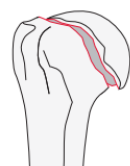
**Group:** Humerus, proximal end segment, articular or 4-part, **anatomical neck fracture** 11C1

**Subgroups:**

**Valgus impacted fracture**  
11C1.1\*



**Isolated anatomical neck fracture**  
11C1.3



\*Qualifications:  
n **Greater tuberosity**  
o Lesser tuberosity  
p Both tuberosities

**Group:** Humerus, proximal end segment, articular or 4-part, **anatomical neck fracture associated with metaphyseal fracture** 11C3

**Subgroups:**

**With a multifragmentary metaphyseal segment with intact articular surface**  
11C3.1



**With a multifragmentary metaphyseal segment with articular fracture**  
11C3.2\*



**With a multifragmentary metaphyseal fracture, with diaphyseal extension and articular fracture**  
11C3.3\*



\*Qualifications:  
x **Simple articular**  
y Multifragmentary articular

Figura 10. Clasificación de las fracturas de húmero proximal de la AO-OTA. (Imagen tomada de Humerus. Journal of Orthopaedic Trauma 32():p S11-S20, January 2018. | DOI: 10.1097/BOT.0000000000001062, License permission by Wolters Kluwer Health Inc. with number of license 5519410746427).

La imagen mostrada es una actualización de 2018 de esta clasificación. Dado lo reciente de la misma, existen escasos estudios que nos permitan extraer conclusiones sobre esta última versión. Si bien, algunos autores han demostrado en sus trabajos que esta versión mejora la concordancia con respecto a la previa de 2007 y se equipara a la clasificación de Neer, aunque siguen reprochándole la dificultad de codificación y, además, exponen la necesidad de integrar los modelos impresos en 3D en la misma como paso hacia el futuro, así como la realización de nuevos estudios con una mayor población de estudio [Marongiu et al., 2020].

Existen otras clasificaciones, como la de Mayo-Fundación Jiménez Díaz, menos estudiadas en la bibliografía pero que, aun así, muestran concordancias interobservador e intraobservador adecuadas según Kappa-Cohen [Foruria et al., 2022].

Por todo ello, no se puede hablar de un patrón de oro o Gold Standard (en adelante utilizaremos este anglicismo) respecto a clasificación, aunque la mayoría de la bibliografía actual se debate entre las clasificaciones de Neer y HGLS de Hertel.

### 1.2.6 Opciones terapéuticas en las fracturas de húmero proximal

En el presente apartado se describirán las distintas alternativas que existen en el tratamiento de las fracturas de húmero proximal, así como los abordajes quirúrgicos más frecuentemente utilizados para las distintas técnicas. Este apartado será puramente descriptivo y no se comentarán las indicaciones y decisiones terapéuticas en torno a cada técnica, dado que todo ello se desarrollará y contextualizará en el apartado [1.2.7 Factores determinantes en la elección terapéutica](#).

De forma global, los tratamientos de las fracturas de húmero proximal pueden ser divididos en 3 grandes grupos en función del concepto terapéutico que se siga:

- Tratamiento conservador: basado en el concepto de que la naturaleza será capaz de restituir el hueso dañado con una conformación similar a la fisiológica que permitirá una buena función.
- Tratamiento con osteosíntesis: se basa en intentar la realineación de los fragmentos óseos, reparando el hueso mediante material exógeno en un acto quirúrgico, favoreciendo así el proceso de reparación natural. Dentro de este grupo encontramos diversas técnicas que se desarrollan a continuación (placas, tornillos, enclavado, agujas...).
- Tratamiento mediante artroplastia: este último concepto consiste en la sustitución del hueso fracturado en su totalidad por un material externo que lo suplirá anatómica y funcionalmente. Suele llevarse a cabo en casos en los cuales el daño del hueso u otras estructuras adyacentes (disfunciones del manguito rotador, por ejemplo) es tan severo que no va a conseguir una restitución natural que permita una función normal. En función del diseño de la prótesis, se puede hablar de artroplastias anatómicas parciales (hemiartroplastias), anatómicas totales o invertidas.

### I.2.6.A Abordajes quirúrgicos

Los abordajes quirúrgicos descritos en el hombro para el tratamiento de las fracturas de húmero proximal son diversos, siendo los más extensamente utilizados los abordajes anteriores y laterales, siendo ambos igualmente válidos [Bhayana et al., 2021; Pavone et al., 2021]:

#### Abordaje anterior o deltopectoral

Es el abordaje tradicionalmente más utilizado en la bibliografía, tomado como Gold Standard en la mayoría de estudios comparativos para abordajes en fracturas de húmero proximal. En muchos estudios presenta ciertas ventajas frente a su principal competidor (el abordaje lateral en sus distintas variantes) tanto en términos de funcionalidad en fracturas grado 2 y 3 de Neer como respecto al grado de exposición de la articulación, especialmente en lo que se refiere a la zona anterior de la misma [Harmer et al., 2018; Rouleau et al., 2020]. Se puede apreciar un esquema de esta vía quirúrgica en la [Figura 11](#).

Este abordaje discurre a través de planos anatómicos, los cuales permiten alcanzar el plano capsular y del manguito rotador de manera directa. En primer lugar, se realiza una incisión cutánea desde la coracoides hacia el brazo a través del intervalo delimitado entre el pectoral mayor y el deltoides, fácilmente delimitable incluso a nivel cutáneo, sobretodo en pacientes con complexión delgada o atlética.

Una vez abierto el plano subcutáneo, se encuentra el mencionado intervalo, sobre el cual yace la vena cefálica, la cual deberá ser disecada cuidadosamente y apartada hacia cualquiera de los dos lados del plano de disección, accediendo otro plano profundo donde se aprecia el tendón del bíceps y la inserción del pectoral mayor, que usualmente deberá ser desinsertada parcialmente para favorecer la rotación externa del húmero y favorecer la reducción de la fractura. Profunda al bíceps estará la cápsula articular que, una vez abierta, drenará el hematoma del foco de fractura. En este punto, se debe realizar un lavado profuso y desbridamiento de tejido capsular y bursal de la zona, hasta exponer de manera apropiada los fragmentos óseos que se pretende reducir.

La gran ventaja de este abordaje reside en el uso de planos anatómicos y en la buena exposición de la cara anterolateral del húmero, sin corromper el manguito rotador. Por el contrario, su principal desventaja reside en la dificultad para acceder a la cara posterior de la extremidad proximal del húmero, es decir, a fragmentos caídos hacia posteroinferior y al tendón del infraespinoso, cuya inserción es sobretodo posterior a la cabeza.

Algunos riesgos a conocer al realizar este abordaje son los posibles daños en el nervio axilar al reducir el fragmento medial, o el riesgo de generar una neurapraxia del nervio musculocutáneo al realizar tracción hacia inferior del tendón conjunto, al cual atraviesa. Otro riesgo menor es el de dañar el paquete vascular circunflejo anterior o “three sisters”, inmediatamente anterior al músculo subescapular, encargándose este paquete de aportar gran parte de la vascularización a la cabeza humeral.

Este abordaje presenta múltiples variantes en la literatura en función de las demandas de la cirugía, aunque todas ellas presentan un esquema de funcionamiento similar al previamente descrito en el texto previo [Trafton et al., 2011; Gadea et al., 2015; Taylor and Sharareh, 2019; Hoppenfeld et al., 2021].

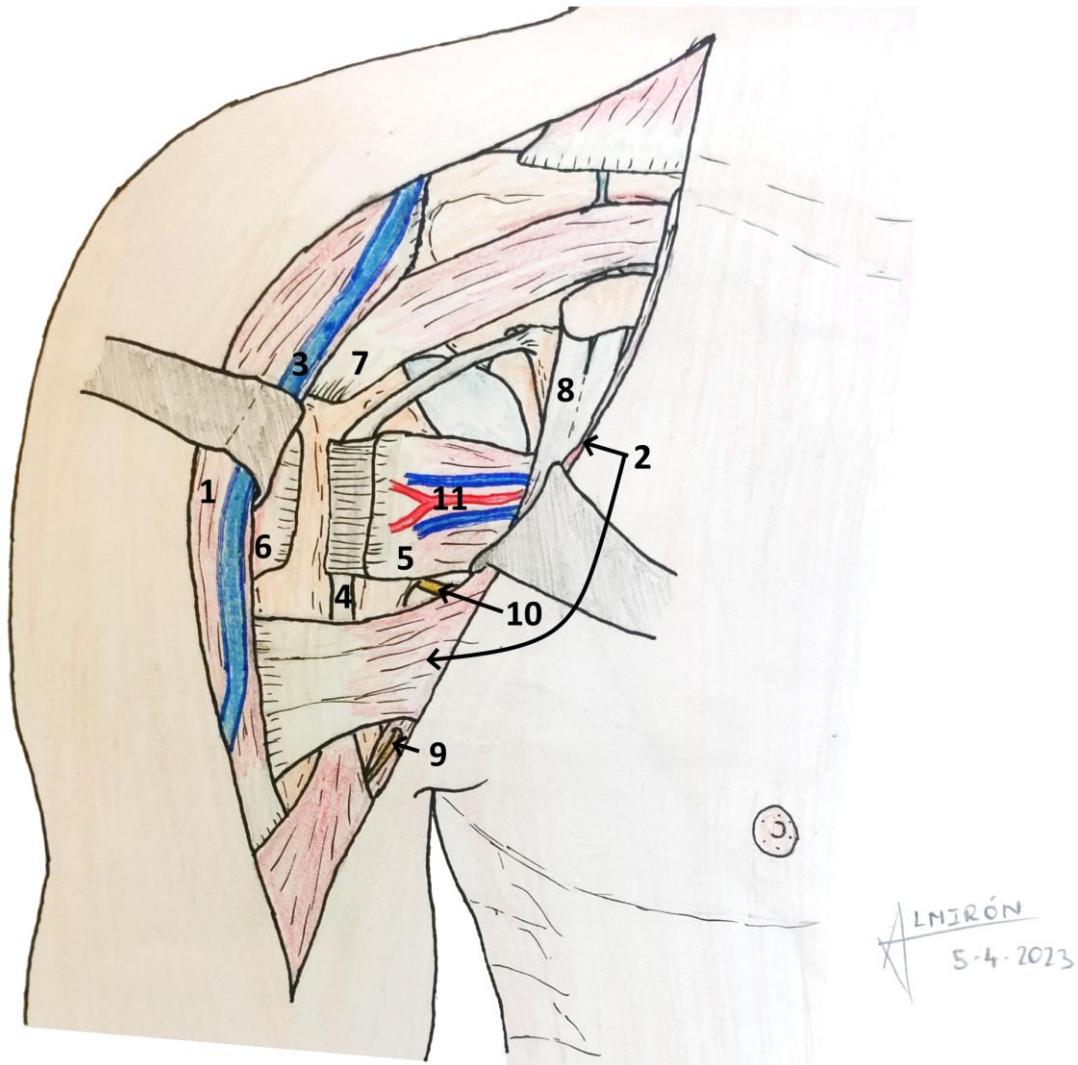


Figura 11. Abordaje deltopectoral. Este abordaje se realiza en el plano natural entre la porción anterior del deltoides (1) y el pectoral mayor (2), quedando este surco delimitado por la vena céfálica (3). En el plano profundo encontramos la porción larga del bíceps (4) y los tendones del manguito rotador – subescapular (5), infraespinoso (6) y supraespinoso (7) insertándose en la cabeza humeral. Medialmente se aprecia el tendón conjunto de la porción corta del bíceps y el coracobraquial (8), que se origina en la apófisis coracoides. Habrá que ser especialmente cauto al distraer esta estructura musculotendinosa para evitar una neurapraxia del nervio musculocutáneo (9), contenido en la misma. Otros elementos de riesgo serán el nervio axilar (10) o el paquete vascular circunflejo anterior o “three sisters” (11).

### **Abordajes laterales o transdeltoideos**

Los abordajes laterales son, junto con el deltopectoral, los más mencionados y utilizados según la bibliografía consultada, siendo una vía que, aunque no accede a través de márgenes anatómicos definidos, da una visión amplia de la cabeza humeral con un escaso riesgo de dañar estructuras nobles. Dentro de los abordajes laterales se puede hablar del clásico transdeltoideo, que accede entre el fascículo posterior y medio del deltoides, y de la variante anterolateral de Mackenzie, que accede entre los vientres medios y anterior. Curiosamente, a pesar de sus similitudes, no se han encontrado estudios que los comparen entre sí de manera directa, de modo que no se puede hablar de que existan diferencias entre ellos. En este apartado se describe como paradigma de los mismos el transdeltoideo tradicional.

Existen algunos estudios que comparan este abordaje con el deltopectoral, los cuales hablan de la superioridad del transdeltoideo ya sea por dar una menor tasa de necrosis de la cabeza y tiempo quirúrgico, o bien por conseguir mejores reducciones del troquíter que en el abordaje deltopectoral [Xie et al., 2019; Maluta et al., 2022]. No obstante, existen múltiples trabajos que defienden al deltopectoral, como se ha mencionado en el apartado previo.

En la práctica, la mayor ventaja de este abordaje en comparación con el anterior es la fácil exposición de la zona posterior de la cabeza y el acromion, pudiéndose incluso exponer la articulación acromioclavicular y/o la coracoides en variantes ampliadas de la misma, a expensas de perder exposición de la glena y la cara anterior del húmero, además de precisar de la apertura del manguito rotador, con el consiguiente riesgo de iatrogenia.

En este abordaje se realiza un acceso directo a través del tejido subcutáneo hasta exponer las fibras del deltoides, las cuales son separadas cuidadosamente hasta exponer el plano profundo, donde encontramos el manguito rotador, la bursa subacromial (que se extrae) y parte de la cabeza humeral desnuda.

El gran riesgo de este abordaje reside en dañar el nervio axilar, el cual discurre transverso a la dirección del abordaje a aproximadamente 5-7cm distalmente al acromion, siendo dicha franja la zona de riesgo del abordaje, la cual deberá ser evitada no sólo en el acceso directo, sino en la introducción de tornillos percutáneos para los distintos dispositivos que pretendamos implantar.

Dependiendo del autor, en algunos casos estará indicado localizar el nervio axilar y excluirlo de la disección, mientras que en otros casos estará indicado no buscarlo. Este nervio se encarga de dar sensibilidad a una sección lateral del antebrazo y, sobretodo, da la inervación motora del músculo deltoides, teniendo dicho músculo un rol determinante en la funcionalidad de las prótesis invertidas de hombro como sustituto del manguito rotador, como se detallará en el apartado correspondiente

De nuevo, en la literatura se pueden encontrar múltiples variantes a este abordaje, aunque los principales factores del mismo se encuentran descritos en el texto suprayacente y se pueden apreciar en la [Figura 12](#). [Trafton et al., 2011 (1); Trafton et al., 2011 (2); Taylor and Levine, 2015; Day and Levine, 2016; Hoppenfeld et al., 2021].

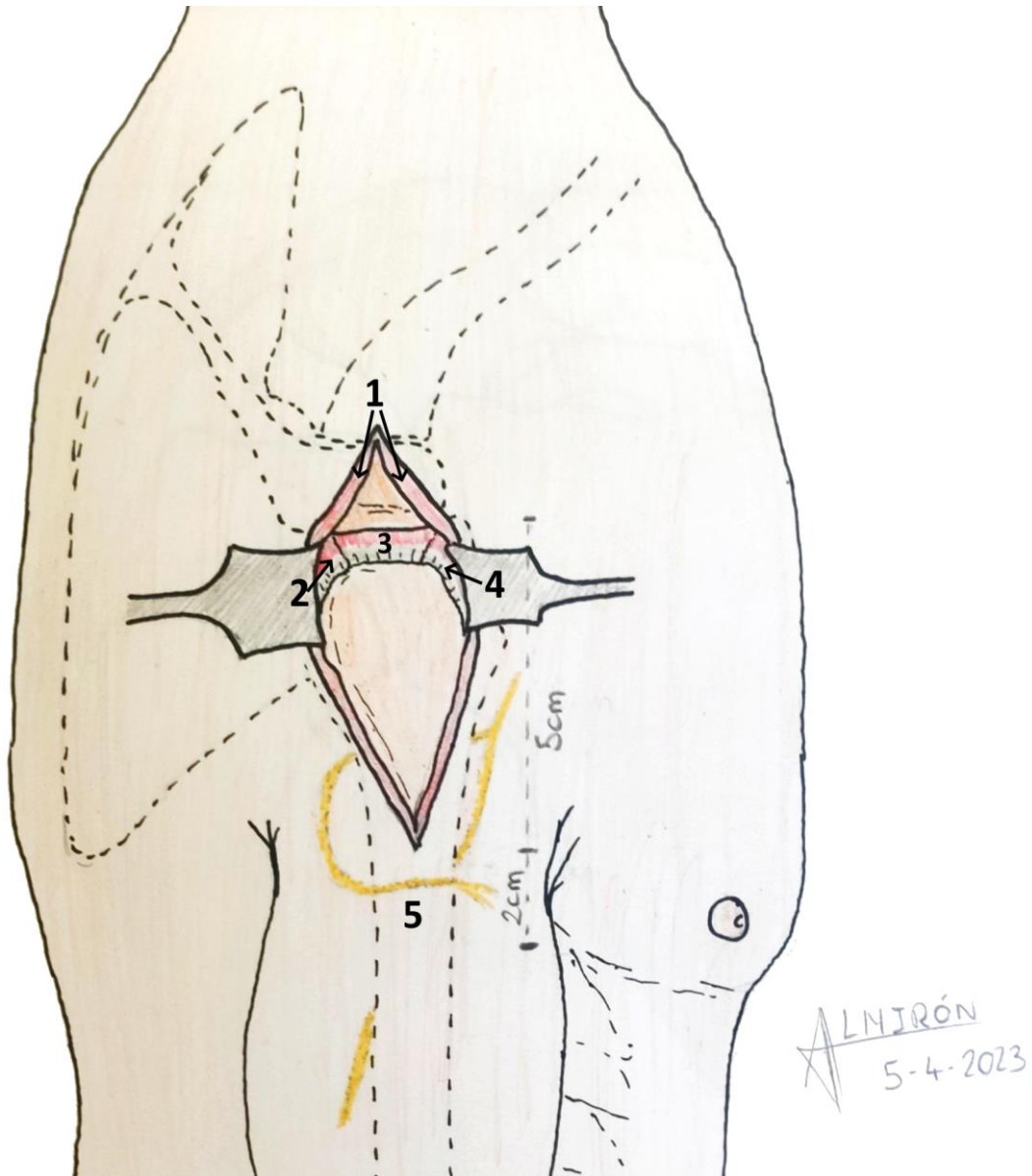


Figura 12. Abordaje lateral o transdeltoideo tradicional. Se puede apreciar cómo se accede a través del plano lateral y se abre el deltoide (1) hasta exponer el húmero, parcialmente cubierto por el manguito rotador – infraespinoso (2), supraespinoso (3) y subescapular (4). Se aprecia también la zona de peligro del nervio axilar o circunflejo, situado aproximadamente a 5-7cm de la punta del acromion y discurriendo en un sentido horizontal.

### **Otros abordajes menos utilizados**

Además de los abordajes mencionados, cabe hablar de otros dos menos utilizados, a destacar principalmente dos grupos:

- Abordajes posteriores: excepcionalmente utilizados, principalmente cuando existe una luxación posterior de la cabeza con fracturas de escápula asociadas, siendo el más utilizado el abordaje de Judet. Su principal riesgo reside en la posibilidad de dañar el nervio supraescapular en su paso desde la fosa supraespinosa a la infraespinosa.
- Abordajes mediales: son nuevos abordajes que están empezando a extenderse en los últimos tiempos, aunque la cercanía del plexo braquial y las estructuras vasculares, además de lo novedoso de los mismos, hace que no estén entre los abordajes más utilizados entre los traumatólogos. En los últimos años, algunos autores han intentado popularizar este abordaje, realizado a través del tendón conjunto del dorsal ancho y redondo mayor, aduciendo la facilidad que aporta para reducir la bisagra medial de la fractura y evitar el varo, ya sea como técnica aislada o sumada a otros abordajes [Wang et al., 2021; Xiang et al., 2022]. En su contra, juegan algunos argumentos como son la proximidad de estructuras neurovasculares relevantes, escasa visibilidad, poca casuística disponible actualmente, acceso a través de la axila (zona contaminada) o el riesgo de impingement del material implantado con la parte inferior de la glena.

### **I.2.6.B Tratamiento conservador**

El tratamiento conservador de las fracturas de húmero proximal está principalmente indicado en los casos de fracturas con escaso desplazamiento o en pacientes que no son candidatos a ser sometidos a una cirugía, debiéndose tener en cuenta variables como la edad, patrón de fractura (desplazamientos menores a 5mm entre fragmentos), mano dominante u otras patologías asociadas, entre otros. [Triplet, 2022]

En líneas generales, se entiende que la mayoría de fracturas de húmero proximal pueden ser tratadas mediante este método [Beks et al., 2018; Soler-Peiro et al., 2020]. En el tratamiento conservador es indispensable realizar una rehabilitación lo más temprana posible, ya que se ha demostrado en múltiples trabajos que la movilización entre la primera y la tercera semana favorece mejores resultados funcionales en este tipo de fracturas cuando son tratadas conservadoramente [Hodgson, 2006; Lefevre-Colau, 2007; Martinez-Catalan, 2023].

En una primera fase se acepta la inmovilización como base del tratamiento, ya que disminuirá el dolor en estadios muy precoces. Algunos trabajos defienden que esta inmovilización debe ser llevada a cabo en una ligera rotación externa y abducción para disminuir la tasa de consolidación en rotación interna, desplazamientos secundarios o consolidaciones en valgo por el efecto de tracción del pectoral mayor sobre la diáfisis [Martinez-Catalan, 2023]. Otros autores hablan incluso de llevar la rotación externa hasta una posición neutra del brazo, con buenos resultados [Yamada et al., 2018]. Actualmente existe cierta controversia respecto a si existen

diferencias entre inmovilizar solamente una o hasta tres semanas, no habiendo consenso sobre el tiempo óptimo, aunque se acepta que lo ideal se encuentra entre estas dos opciones.

Martinez-Catalan presenta en su estudio de 2023 un protocolo de rehabilitación rápida con buenos resultados para la mayoría de fracturas sin inestabilidad manifiesta o afectación severa de la cabeza (Split cefálico, fractura-luxación o impactaciones). Este protocolo consiste en lo siguiente:

- Semana 1-2: se permiten actividades de higiene básicas. El cabestrillo es retirado para el descanso y para realizar ejercicios. Tan pronto como lo permita el dolor, se iniciarán los ejercicios pendulares de Codman de forma pasiva por cuatro a seis veces diarias.
- Semanas 3-5: realizar ejercicios de elevación pasiva anterior en decúbito supino, también conocidos como ejercicios del orador o "The prayer", en los cuales se realiza una flexión anterior del brazo en rotación externa neutra, ayudándose del brazo sano. Estos ejercicios pueden hacerse sentado o de pie según se tolere. El ejercicio más recomendado es el "shoulder forward elevation".
- Semana 6-Mes 3: inicio de ejercicios asistidos (ayuda para vencer la gravedad) en una primera fase y, una vez se toleren, ejercicios activos e isométricos sin peso. En esta fase destacamos, en orden cronológico, los ejercicios "supported shoulder rotation", "shoulder internal rotation", "walk-up exercise", "shoulder forward elevation", "shoulder abduction" y ejercicios isométricos de hombros.
- Mes 3 en adelante: ejercicios de fortalecimiento con pesas controlados, sobretodo de rotación interna y externa.

Todos estos ejercicios pueden ser realizados de forma domiciliaria, con buenos resultados, aunque si se precisa se puede recurrir a un fisioterapeuta. Todos los ejercicios descritos se encuentran detallados ampliamente en la página [https://orthoinfo.aaos.org/en/recovery/shoulder-surgery-exercise-guide/#:~:text=Shoulder%20Forward%20Elevation%20\(Assisted\),for%2010%20to%2020%20seconds](https://orthoinfo.aaos.org/en/recovery/shoulder-surgery-exercise-guide/#:~:text=Shoulder%20Forward%20Elevation%20(Assisted),for%2010%20to%2020%20seconds).

Respecto al seguimiento, es necesario hacer radiografías seriadas en las semanas 3, 6 y 12 [Martinez-Catalan, 2023]. Podría ser recomendable, además, realizar una radiografía en la primera semana en el caso de fracturas con gran inestabilidad.

En resumen: el tratamiento conservador se puede considerar de elección en fracturas con escaso desplazamiento, sin signos de inestabilidad y/o en pacientes con pluripatología asociada, pudiendo dar resultados buenos siempre y cuando se someta a los pacientes a un protocolo de autorehabilitación precoz desde la primera semana.

### **I.2.6.C Osteosíntesis – Placa y tornillos**

En la actualidad se acepta que la osteosíntesis de fracturas multifragmentarias puede ser llevada a cabo mediante placas y tornillos. Existen múltiples sistemas de placa y tornillos en el mercado para este tipo de fracturas, dependiendo de la casa comercial (AxSOS – Stryker, TIFIX – LITOS, PERILOC – Smith&Nephew, NCB – Zimmer, PEEKPower – Arthrex...) siendo la más usada, según la bibliografía, la placa PHILOST™ de Synthes – Johnson&Johnson [Jabran et al., 2018]. Se puede apreciar un esquema de esta placa en la [Figura 13](#).

Los sistemas de placas y tornillos se basan en el concepto de placa-puente o sostén, en el cual se establece un espaciador interno (placa) con capacidad para sujetar cada uno de los fragmentos mediante tornillos que van autobloqueados al sistema. De esta manera, se consigue que los fragmentos queden correctamente alineados para propiciar una reparación biológica secundaria de los mismos [Fankhauser et al., 2005; Ring, 2007; Ramos-Maza et al., 2016].

Estas placas presentan tornillos multidireccionales que permiten sostener de forma divergente cada fragmento. Cobra especial relevancia el tornillo inferior de la cabeza, el cual debe atravesar lo más distal posible el cóncavo humeral, es decir, la zona de mayor consistencia ósea [Mehta et al., 2018]. Existen técnicas para la colocación percutánea de la placa.

Conceptualmente, el primer tornillo suele adherirse a compresión contra el hueso diafisario para facilitar la colocación del resto, que serán autobloqueados a la placa tras conseguir una reducción manual o con pinzas y agujas de los distintos fragmentos óseos. Este primer tornillo mencionado puede ser sustituido en última instancia por otro tornillo autobloqueado a la placa. Se utilizarán tantos tornillos como sean necesarios para la fractura, recomendándose un mínimo de 2 tornillos diafisarios y de 1 tornillo epifiso-metafisario por cada fragmento que presente la fractura (usualmente se recomiendan 5-7 tornillos) [Kim et al., 2021]. Existen placas de distintas longitudes, pudiéndose usar placas más largas para aquellas fracturas que presenten un trazo con extensión hacia la diáfisis, frecuente en este tipo de fracturas.

Dado el concepto de sostén de la placa y el encontrarnos en una zona articular, es especialmente relevante el hecho de conseguir una buena reducción si hay varios fragmentos, para permitir una buena consolidación sin pseudoartrosis y favorecer la funcionalidad del húmero. Habrá que ser especialmente cuidadoso con la reducción cervicodiafisaria, ya que existe una tendencia al valgo en estas fracturas. Se debe buscar un ángulo cervico-diafisario de alrededor de 135° para el buen funcionamiento del húmero [Saber et al., 2022].

A la hora de insertar los tornillos, es indispensable controlar la distancia a la que estos quedan del hueso subcondral en la zona más medial. Por una parte, el hueso subcondral aportará un buen agarre de los tornillos, reduciendo el riesgo de fracaso por aflojamiento del material de osteosíntesis. Sin embargo, otros autores sostienen que cualquier cabeza de húmero sintetizada está sometida a una necrosis, al menos parcial, de la misma, lo cual desemboca en un colapso de la cabeza con la subsiguiente exposición de aquellos tornillos que queden muy superficiales

en el hueso (cut-out). Este riesgo de cut-out sería estimable preoperatoriamente midiendo el grosor céfalico en un TAC [Stern et al., 2021]. Al final de la cirugía, se deben realizar varias proyecciones para comprobar que no existen tornillos mal emplazados, al igual que se debe comprobar que no se note ningún roce al movilizar la articulación [Clavert et al., 2010]. Algunos autores afirman que esta técnica debe complementarse con aloinjerto de peroné para disminuir la tasa de fallo [Berkes et al., 2014; Saltzman et al., 2016; Myers et al., 2020; Jang y Kim, 2021].

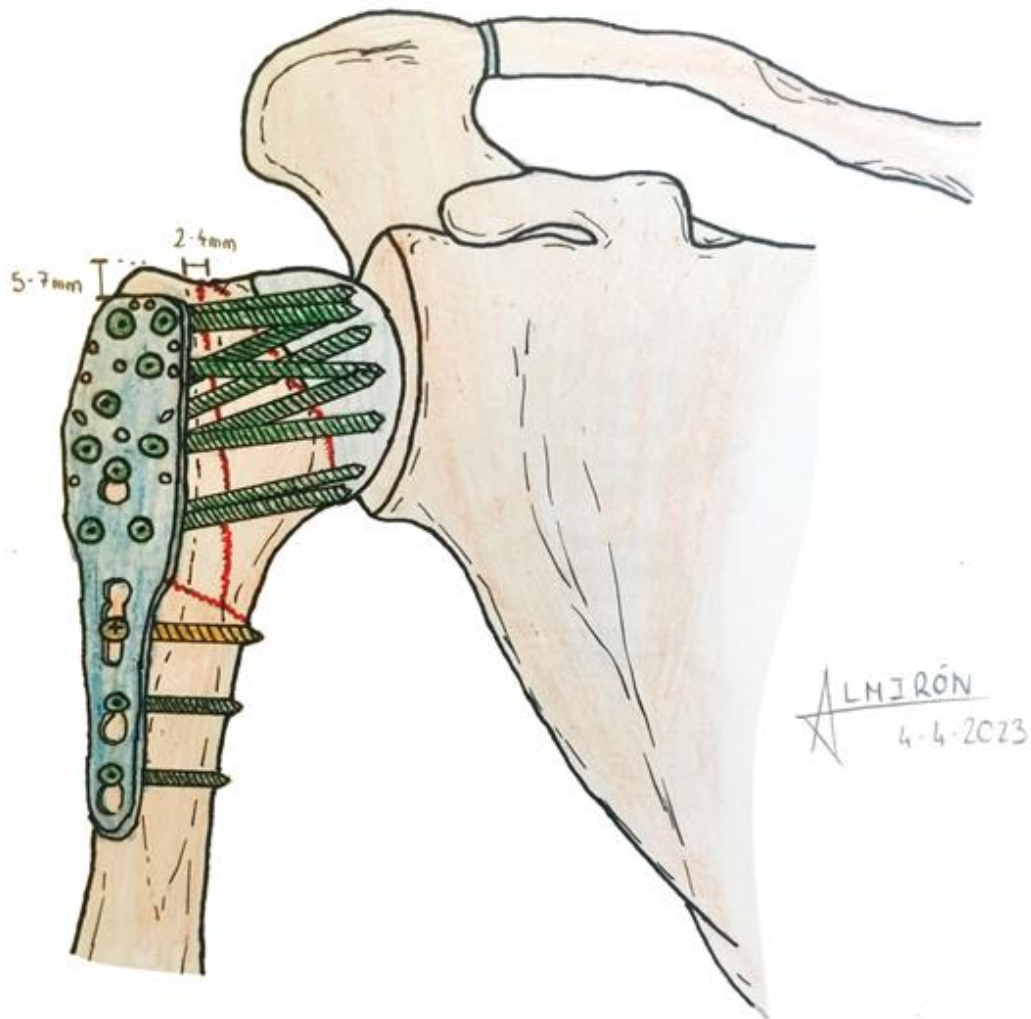


Figura 13. Sistema de osteosíntesis con placa y tornillos. Dibujo basado en sistema PHILOST™ de Synthes Johnson&Johnson ©, por ser el sistema más frecuente según la literatura. Se puede apreciar un tornillo dorado que hace referencia al tornillo inicial de compresión de placa a hueso, junto con otros tornillos de color verde que hacen referencia a los distintos tornillos autobloqueados para cada uno de los fragmentos, constituyéndose un sistema de “bridging - sostén”. La placa se sitúa unos 2-4mm posterior a la corredera bicipital y unos 5-7mm por debajo de la punta del troquíter, para evitar que genere impingement en los arcos de movimiento del hombro. Se puede apreciar la existencia de dos tornillos autobloqueados en la zona del cóndilo humeral. Se puede ver también una serie de forámenes de menor calibre a los cuales se anudarán los distintos músculos del manguito rotador para conseguir una mejor reducción de las tuberosidades sobre la placa como medida complementaria al propio material de osteosíntesis.

### **I.2.6.D Osteosíntesis – Enclavados endomedulares**

La osteosíntesis con enclavado es un método mínimamente invasivo en el cual se sigue un principio de sostén (tornillos) combinado con un tutor axial (el propio clavo). Históricamente se ha argumentado que los clavos eran una alternativa con peores resultados funcionales y mayor tasa de complicaciones que las placas de osteosíntesis en este tipo de fracturas, quedando relegados a indicaciones muy específicas [Lekic et al., 2012; Gracitelli et al., 2016;]. La principal complicación que se les atribuía a estos clavos era la presencia de dolor residual del manguito rotador tras la introducción de estos a través del mismo.

Sin embargo, en los últimos años el diseño de los clavos intramedulares ha cambiado drásticamente, siendo la diferencia más notable con respecto a los antiguos clavos el nuevo diseño totalmente recto. Este factor ha resultado determinante en el cambio del punto de entrada del clavo, actualmente más medial respecto a lo previamente existente. Este cambio de entrada implica un acceso al húmero a través del vientre muscular del manguito rotador, lo cual evita una disrupción de la zona tendinosa insercional, con menor potencial regenerativo por una menor vascularización y una mayor sollicitación biomecánica [Lopez et al., 2014; Hao et al., 2017; Mocini et al., 2021;].

Así, estudios recientes respaldan resultados similares al operar fracturas de húmero proximal tanto con placas como con clavos endomedulares, habiendo incluso estudios a favor del enclavado, estando estos estudios especialmente enfocados en fracturas tipo 2 y 3 de Neer. Además, la mayoría de ellos remarcan el hecho de un menor número de complicaciones por ser menos invasivos y mostrar una menor tasa de sangrado peri-quirúrgico que las placas de osteosíntesis. Por último, el riesgo de daño neurológico se ha estimado como similar al de otros sistemas, siempre teniendo en cuenta que deben evitarse si, preoperatoriamente, existe una parálisis del nervio radial instaurada de forma aguda, ya que esto es una indicación absoluta de realizar una apertura del foco y exploración neurológica [Sun et al., 2018; Shi et al., 2019; Fan et al., 2022; Setaro et al., 2022; Martinez-Catalan y Boileau, 2023].

Los clavos de nueva generación permiten el re-anclaje del manguito rotador si fuera preciso, de manera que se puede realizar un abordaje MIS anterolateral ampliado y re-anclar las tuberosidades al clavo del mismo modo que se haría con una placa de osteosíntesis. Este anclaje tiene lugar sobre los pernos proximales del clavo, con forámenes adaptados para este cometido.

Este dispositivo se bloquea proximal y distalmente a la fractura mediante tornillos. Es de suma importancia tener precaución para no dañar el nervio axilar o circunflejo, que se puede encontrar en el trayecto de entrada de los mencionados tornillos. Tal y como se describió en los aparatados previos, este nervio discurre de forma transversa a unos 5-7cm caudal al acromion, de manera que esta será la franja a evitar durante el acto quirúrgico. Se puede ver un esquema general del enclavado endomedular de húmero proximal en la [Figura 14](#).

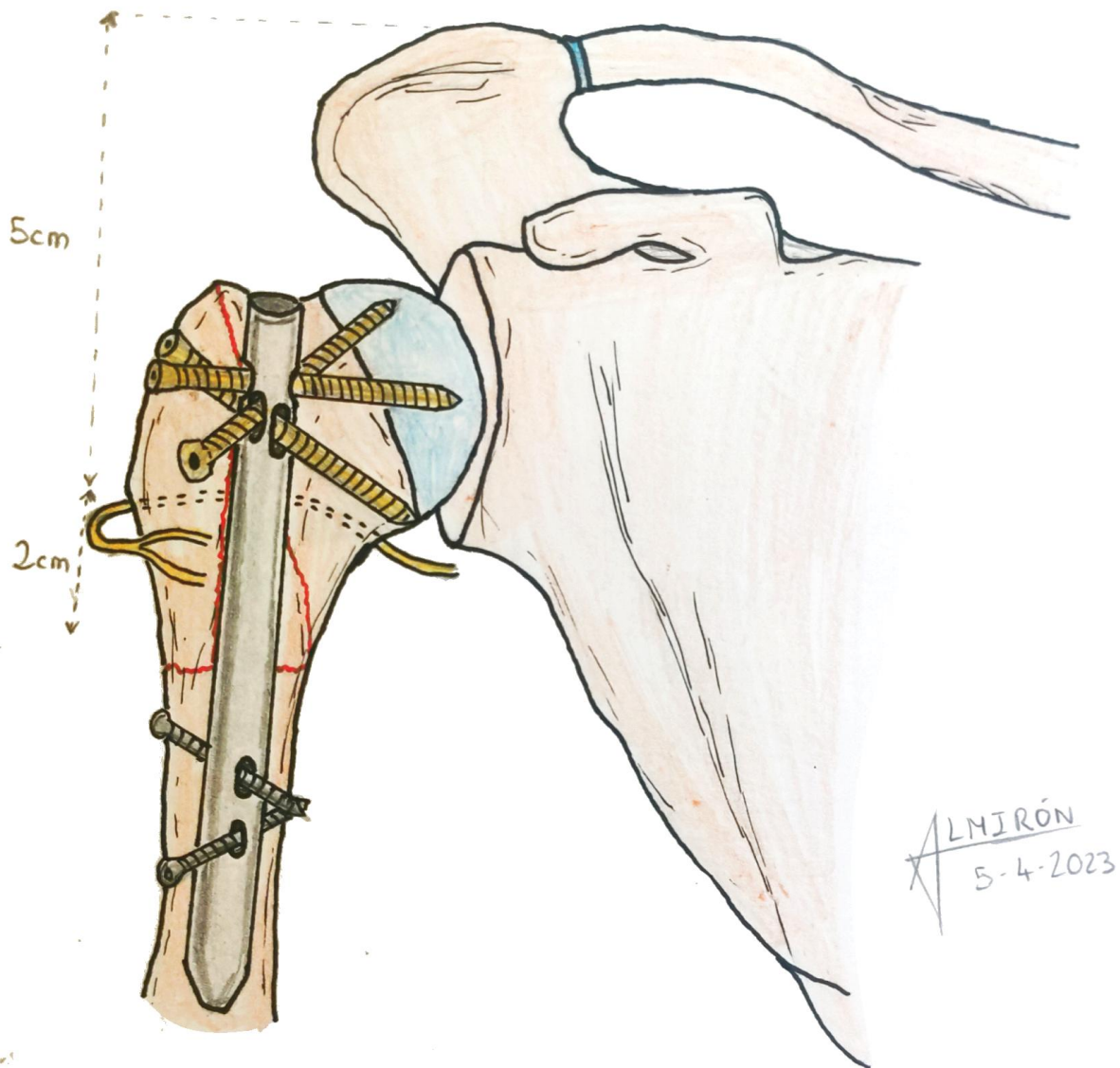


Figura 14. Enclavado endomedular de las fracturas de húmero proximal. Se puede apreciar el punto de acceso con los clavos de nueva generación medialmente a la tuberosidad mayor (troquíter). Los tornillos proximales tienen una conformación especial de mayor grosor para permitir un mejor agarre de los fragmentos, además de forámenes en la cabeza que dan una alternativa para el reanclaje de las tuberosidades mediante sutura. Los bloqueos distales son tornillos corticales simples que se deben introducir en dos ejes del espacio para bloquear la movilidad axial y rotacional del clavo. En la imagen se puede apreciar el trayecto del nervio axilar o circunflejo a través de la zona lateral del húmero, y se demarcan los 2 cm que determinan la zona de peligro, en la cual no se deben introducir tornillos percutáneos para evitar daños del mismo con la subsiguiente disfunción del deltoides.

### I.2.6.E Osteosíntesis – Tornillos percutáneos

Es una técnica válida para trazos simples, buscando la compresión de los fragmentos mediante la introducción de tornillos perpendiculares al trazo de fractura, como se ve en la [Figura 15](#). El número de tornillos puede oscilar entre uno y tres usualmente (aunque hay autores que intervienen fracturas más complejas con tornillos transversos a cada trazo, usando un mayor número de ellos), y pueden acompañarse o no de una arandela que favorezca la compresión. La clave de estos tornillos reside en la reducción previa adecuada. Deben tener rosca parcial para ejercer el mencionado efecto de compresión. Es necesario ser cauteloso evitando una sobrecompresión, ya que esto puede generar un hundimiento de las tuberosidades y un mal resultado funcional [Fink Barnes et al., 2015; Gunst et al., 2018; Johnson y Pandey, 2019]. Han surgido alternativas a esta técnica, como las nuevas placas gancho, con resultados comparativos prometedores [Kuan et al., 2022]. Su principal uso es en fracturas de troquíter aisladas, especialmente en aquellas con un índice de impingement  $> 0.7$  que pueda dar como secuela patología residual del manguito rotador [Nyffeler et al., 2019; Liu et al., 2020]

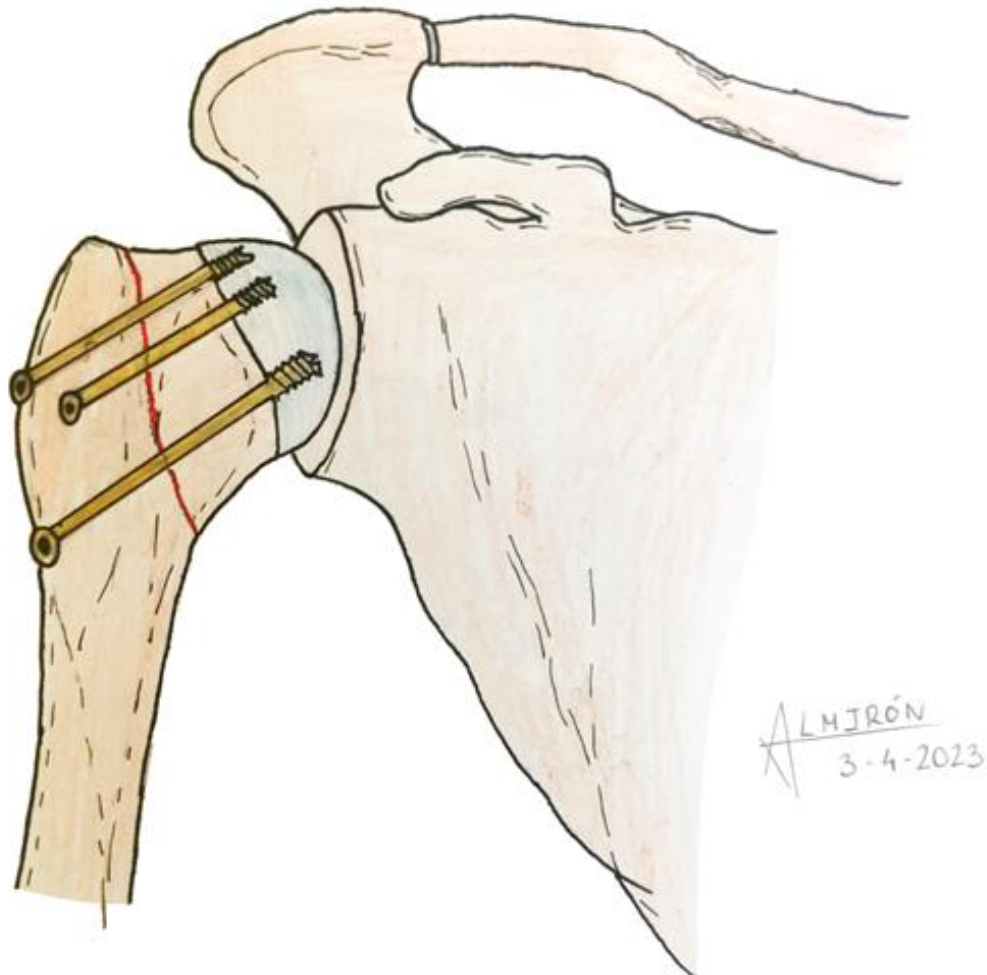


Figura 15. Tornillos canulados en fractura de húmero proximal. Los tornillos se disponen de manera perpendicular al trazo de fractura, Al tener rosca parcial, ejercen un efecto de compresión sobre el foco de fractura que favorece la consolidación per primam del mismo. Dependiendo del tamaño del fragmento, pueden usarse entre uno y tres tornillos.

### **I.2.6.F Osteosíntesis – Pinning ó agujas percutáneas**

Es una técnica percutánea, es decir, que, al igual que los tornillos, es poco invasiva. Si bien, ha quedado relegada a indicaciones muy concretas por la ausencia de compresión de las mismas y la alta tasa de complicaciones, teniendo peores resultados que otras técnicas ya expuestas [Setaro et al., 2022]. Se asocian a daños en múltiples estructuras, como el bíceps, nervio axilar, vena cefálica o nervio musculocutáneo, sumado a un gran riesgo de penetrar a través del catílago humeral y dañar la articulación glenohumeral [Rowles y McGrory, 2011].

La técnica más aceptada para su colocación es la técnica “en palmera” descrita por Kapandji, aunque han surgido alternativas como el sistema MIROS®. Si bien, ninguna de estas técnicas se acepta como una buena alternativa, dada la alta tasa de complicaciones en su introducción y por migración de las mismas, sumado a resultados pobres que difícilmente compiten con el tratamiento conservador [Zacharia et al., 2016].

Una posible indicación podría ser su uso en fracturas en esqueleto inmaduro, aunque están asociadas a más complicaciones que el enclavado endomedular [Hutchinson et al., 2011]. En casos muy seleccionados podrían ser una alternativa de tratamiento [Jayarajah et al., 2021].

### **I.2.6.G Artroplastia – Hemiartroplastia de hombro**

Es una técnica que consiste en la sustitución de solamente el componente humeral de la articulación del hombro, de manera que para que funcione correctamente precisará de todos los elementos que necesita un hombro normal de forma fisiológica, es decir, un buen funcionamiento del manguito rotador y una buena congruencia entre la prótesis y la glena, que debe estar sana de base. Es una técnica que ha perdido indicaciones en las fracturas de húmero proximal, aunque sigue teniendo su lugar en este campo [Schultz et al., 2021].

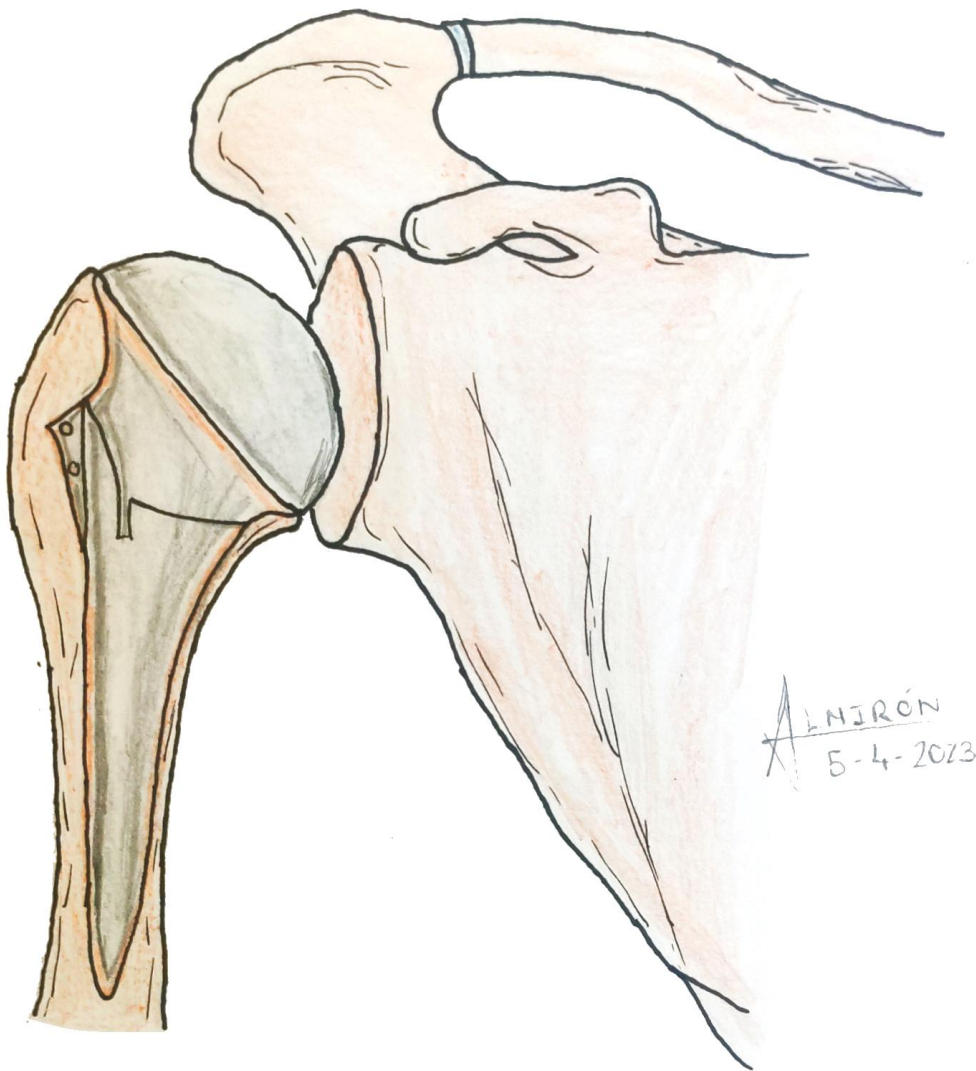
En la actualidad existen múltiples estudios que relegan la indicación de esta técnica en el caso de fracturas a paciente jóvenes con un buen manguito rotador y fracturas simples, ya que en fracturas complejas la prótesis invertida muestra mejores resultados [Shukla et al., 2016].

A la hora de colocar la prótesis es importante evitar una sobredimensión de la misma o un exceso de lateralización, ya que esta podría inducir una tensión añadida que puede generar un mal funcionamiento del manguito rotador.

Una técnica relativamente novedosa a la hora de implantar estas prótesis es la llamada “Ream and Run”, en la cual se coloca la prótesis en el componente humeral mientras que el componente glenoideo es preservado. Si bien, en esta variante se realiza un fresado cóncavo sobre la glena que trata de preservar el hueso propio y el tejido labral. Esta técnica permite una mejor congruencia glena-implante y medializa el centro funcional de la articulación, lo cual parece favorecer la funcionalidad del manguito rotador. Sin embargo, es una técnica demandante desde el punto de vista de la recuperación, y se ha estudiado principalmente en casos de osteoartritis

asociada, requiriendo en muchas ocasiones procedimientos de salvamento que desembocan en una prótesis total de hombro [Matsen, 2015; Matsen et al., 2021].

En las fracturas, es importante anclar las tuberosidades a la prótesis, lo cual se puede hacer por múltiples métodos dependiendo del dispositivo que se implante. En la [Figura 16](#) se puede apreciar un esquema de una hemiartroplastia de hombro derecho, la cual tiene un funcionamiento biomecánico similar al del hombro normal, que se explica en la [Figura 18](#). Está ampliamente aceptado que en estos casos se deben usar vástagos modulares convertibles que faciliten un potencial rescate futuro [Triplet, 2022].



*Figura 16. Hemiartroplastia de hombro derecho. En la imagen se puede apreciar cómo la prótesis sustituye la zona proximal al cuello anatómico humeral, embutiéndose en el interior de la zona metafisodiafisaria para anclarse de manera estable. Según el diseño, las prótesis pueden ser cementadas o no cementadas, o incluso pueden bloquearse en la diáfisis mediante tornillos. Las prótesis de diseño moderno presentan forámenes que permiten el reanclaje de las tuberosidades y/o el manguito si fuera necesario*

### I.2.6.H Artroplastia – Artroplastia total anatómica de hombro

Es una técnica similar a la anterior, aunque algo más demandante por el hecho de sustituir, además de la cabeza, la cavidad glenoidea por otro componente metálico con un polietileno. Es precisamente este polietileno el que suele desembocar en un fracaso de la prótesis, de ahí que sea una técnica denostada para esta indicación actualmente [Matsen, 2015].

El polietileno puede suponer un fracaso de la prótesis por desgaste del mismo durante el seguimiento. Además, una sobredimensión del polietileno puede inducir una lateralización del componente humeral que desemboque en una sobretensión del manguito rotador y su fracaso secundario [Goetti et al., 2021]. Se puede apreciar un esquema de este implante en la [Figura 17](#).

Por todo ello, esta técnica está denostada en las fracturas de húmero proximal, y no hay bibliografía que avale su uso. La artroplastia invertida ha demostrado mejor funcionalidad.

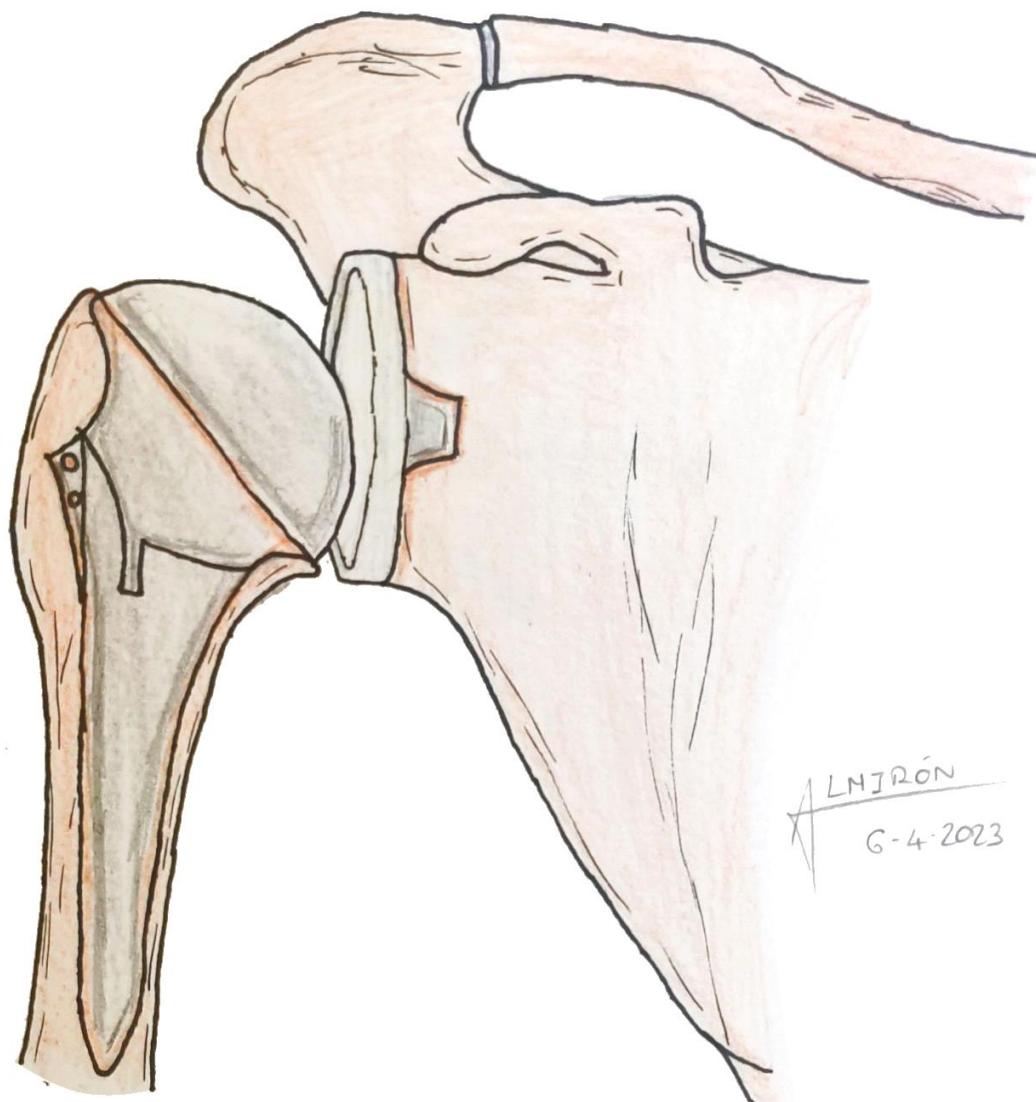


Figura 17. Prótesis total anatómica de hombro. Es una técnica no recomendada en el tratamiento de las fracturas de húmero proximal

### **I.2.6.I Artroplastia – Artroplastia invertida de hombro**

La artroplastia invertida de hombro fue ideada en la década de los 70 en Inglaterra por el equipo de Leeds [Reeves et al., 1972], y fue perfeccionándose hasta las mejoras finales efectuadas por Paul Grammont en los 80 y los 90 [Grammont et al., 1987]. Esta prótesis consigue cambiar el centro de rotación de la cabeza humeral, medializándolo y descendiendo, de manera que genera un mayor brazo de palanca o fulcro por parte del deltoides que, de este modo, es capaz de sustituir el déficit de abducción generado por un supraespinoso defectuoso. De este modo, genera un aumento de abducción respecto a otras prótesis que, si bien no llega a ser normal, mejora sustancialmente la movilidad del hombro intervenido [Sharareh, 2023].

Esta prótesis no mejora per sé las rotaciones del hombro, aunque se puede asociar a transposiciones del dorsal ancho para mejorar la rotación externa, la cual es determinante en una correcta funcionalidad del hombro. En fracturas, se recomienda la reparación de las tuberosidades y usar prótesis de perfil bajo para favorecer la consolidación de las mismas y mejorar la rotación, sobre todo la externa [Anakwenze et al., 2014; Simovitch et al., 2019].

Por tanto, para una buena funcionalidad de esta prótesis es necesario que exista un deltoides viable. De esta manera, una alteración del deltoides o el nervio axilar contraindicará su implantación. En algunos casos de pacientes con alteraciones deltoideas se puede plantear poner la prótesis, siempre y cuando el paciente entienda que el dolor cederá a cambio de tener una movilidad en cierta medida limitada [Läderrmann et al., 2013; Familiari et al., 2018; Sharareh, 2023]. Es importante diferenciar una disfunción deltoidea de una pseudoparálisis del hombro (por artropatía severa del manguito, usualmente), siendo esta última, precisamente, una buena indicación para implantar la prótesis de hombro invertida.

Otros factores que contraindican su implantación son la presencia de infección activa, un defecto acromial que dificulte la biomecánica de la prótesis invertida, o defectos de cantidad o calidad de la glena que pudieran propiciar un aflojamiento de la metaglena.

Las dos complicaciones más marcadas en estas prótesis desde el punto de vista biomecánico son el notching escapular y la luxación. Por una parte, la luxación es especialmente frecuente en casos en los cuales hay un defecto óseo de gran tamaño o imposibilidad para reparar el subescapular, que hace de tirante anterior para evitar la luxación. Por otro lado, el notching es un conflicto de espacio consecuencia del cambio biomecánico de la prótesis, que genera un choque entre la zona inferior de la glena y el húmero proximal en aducción. La forma de evitar este evento pasa por estudiar individualizadamente la anatomía de cada paciente y, en esencia, tratar de descender la implantación de la metaglena respecto a la superficie glenoidea, en ocasiones añadiendo injerto óseo que lateralice discretamente el implante [Lévigne et al., 2011; Boileau et al., 2020; Collotte et al., 2022]. Si bien, esta lateralización puede empeorar la función del deltoides. Además, estos cambios de conformación, aunque disminuyen el notching, siguen estando asociados a tasas de luxación de hasta el 5%. La [Figura 18](#) relata todos los parámetros biomecánicos a tener en consideración en este tipo de prótesis.

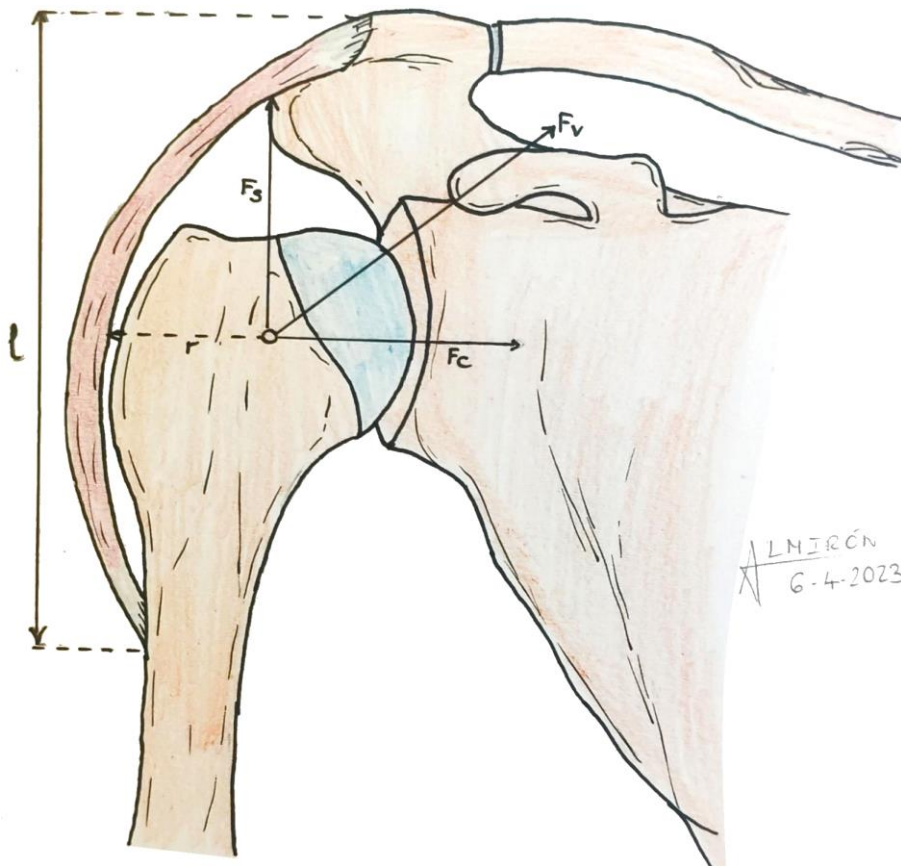
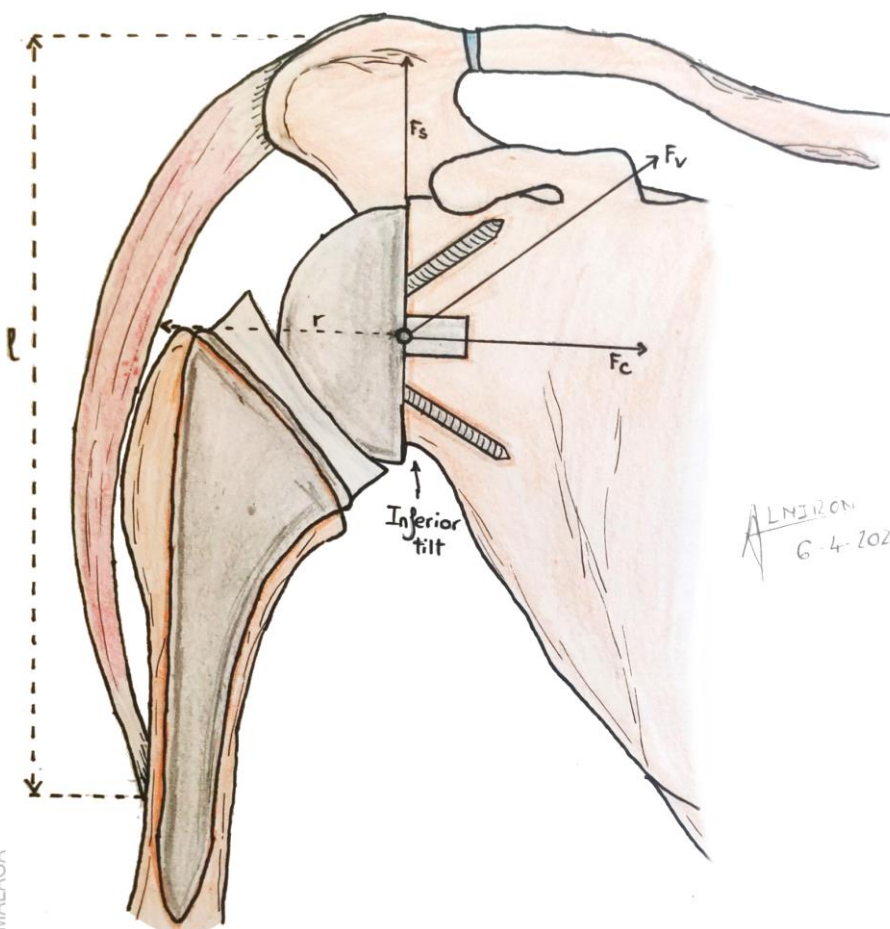


Figura 18. Comparativa entre la biomecánica del hombro fisiológico y la prótesis invertida de hombro. Se puede ver como el deltoides actúa de una manera más medializada y su inserción se encuentra en un punto más distal, lo cual facilita el fulcro en el caso de la prótesis invertida. El vector resultante ( $F_v$ ) de las fuerzas de cizallamiento ( $F_s$  "shearing") y de compresión ( $F_c$  "compression") queda medializado, lo cual favorece la estabilidad del implante.

Se puede apreciar que la implantación de la metaglena debe tener un desplazamiento o tilt inferior para conseguir evitar en cierta medida el notching y favorecer la función. Además, se podría interponer un taco de injerto entre la glena y la metaglena, lateralizando la segunda.



En la imagen se puede apreciar que la prótesis invertida está constituida por una metaglena, que es una hemiesfera que sustituye a la glena y se implanta en la escápula con ayuda de tornillos. Además, habrá un vástago intrahumeral y, entre ambos componentes, un polietileno con una concavidad que se enfrentará a la metaglena.

Su uso en fracturas es cada vez más frecuente [Dillon et al., 2019].

### **I.2.6.J Fijadores externos en fracturas de húmero proximal**

Aunque la evidencia al respecto es escasa a día de hoy y existen pocas guías clínicas que los avalen, es necesario hablar de la existencia de los fijadores externos como alternativa quirúrgica.

Si bien, cabe recalcar que el autor de la presente tesis se posiciona escéptico en su uso basándose en dos premisas: una general en la traumatología, la cual defiende que los fijadores externos son usualmente una herramienta para el control de daños en traumatología que se utilizan para el tratamiento de aquel hueso que necesita ser estabilizado, pero no puede abordarse de una manera invasiva; y otra premisa concreta de los húmeros proximales, que habla de la posibilidad de tratarlo de manera conservadora sin haber evidencia sobre peores resultados que con tratamientos invasivos, como se verá en el apartado [I.2.7 Factores determinantes en la elección terapéutica](#). Por ello, después de este apartado no se volverá a incidir en esta técnica

Han surgido en los últimos años estudios que hablan de resultados prometedores desde el punto de vista clínico en ciertos pacientes, con una invasión mínima y escaso tiempo de cirugía, incluso con una buena evolución en distintas escalas de evaluación de la funcionalidad del hombro a un año vista [Benetos et al., 2012; Zhang et al., 2012]. Además, algunos autores ensalzan su costo-utilidad en el caso de fracturas simples con escaso desplazamiento de los fragmentos, bien por el escaso coste del fijador o por la reducción del tiempo de estancia hospitalaria [Parlato et al., 2014, Maluta et al., 2020].

Además, se desarrolló un trabajo en el cual, mediante reconstrucción por modelos 3D, se permitía prever y referenciar de manera correcta dónde debían insertar los distintos pines de fijación para obtener una buena fijación intraósea y una buena alineación [Xing et al., 2021].

Otro trabajo aduce como ventaja de esta técnica la posibilidad de rehabilitación precoz. [Martín-Hernández et al., 2006] Sin embargo, como ya se ha visto en apartados previos, esta tendencia a la movilización precoz está cada vez más presente en todas las técnicas terapéuticas, habiéndose convertido en la rehabilitación precoz en Gold Standard adyuvante a cualquier tratamiento.

Respecto a la conformación del fijador, existen múltiples fórmulas a seguir. Recientemente se ha publicado un estudio biomecánico que promueve la colocación de 8 pines de 2.5mm, demostrando una estabilidad relativa similar a los constructos de placa con tornillos. Este mismo artículo demuestra que otros constructos con menos pines tienen una menor estabilidad relativa y una mayor tasa de desplazamientos secundarios [Harbrecht et al., 2022].

En contra de esta técnica, además de lo previamente mencionado, cabe destacar el riesgo de lesión de estructuras nobles al insertar los pines a ciegas o el riesgo de inoculación de cutibacterium acnés en planos profundos, dado el errático comportamiento de esta bacteria y el potencial riesgo de requerirse cirugías futuras en estos hombros intervenidos [Hsu, 2019].

---

### 1.2.7 Factores determinantes en la elección terapéutica

Como se ha mencionado en apartados previos, la decisión quirúrgica va a depender de la gravedad de la fractura, la cual viene dada no sólo por el número de fragmentos y su desplazamiento, si no por otras características descritas por Hertel en su trabajo, y que se volverá a mencionar [Hertel et al., 2004]:

1. ¿Qué longitud tiene la bisagra posteromedial de la cabeza?
2. ¿Cuánto desplazamiento hay entre la diáfisis y el macizo de la cabeza?
3. ¿Cuánto se han desplazado las tuberosidades?
4. ¿Existe angulación de la cabeza? ¿Cuánta angulación?
5. ¿Hay luxación glenohumeral?
6. ¿Existe fractura por impronta en la cabeza? (Lesiones de Hills-Sachs y McLaughlin)
7. ¿Existe un Split o separación de la cabeza con afección de >20% de la misma?

En esencia, las preguntas mencionadas se podrían resumir en dos: ¿existe una buena alineación y estabilidad de los fragmentos que permita una consolidación sin necesidad de cirugía?, y ¿existen factores que indiquen que la vascularización de la cabeza humeral pueda estar comprometida y que, por tanto, pueda producirse una necrosis de la misma?

Cabe recordar que, según lo visto en la anatomía del húmero, la vascularización de la cabeza depende principalmente de ramas arteriales que llegan a esta zona desde la zona medial humeral. Es por ello que el propio Hertel describió en el trabajo mencionado que existían factores de rotura de la zona medial humeral que condicionaban un mayor riesgo de necrosis de la misma, a destacar una longitud del cóndilo humeral menor a 8mm o una disrupción de la bisagra medial >2mm, además de desplazamientos en valgo o, sobretodo, en varo de la cabeza respecto a la diáfisis. El número de fragmentos también se relaciona con la posibilidad de reconstrucción de la cabeza y con un riesgo de necrosis proporcional al número de ellos [Chandrappa et al., 2017].

Por tanto, cuantos más factores que aumenten el riesgo de isquemia se ponga en la balanza, más se deberá uno decantar hacia la necesidad de una artroplastia, ya que, si intentamos conservar hueso mediante tratamiento conservador u osteosíntesis, este puede acabar en una necrosis con colapso y pérdida de esfericidad de la cabeza. No obstante, es importante saber que la necrosis avascular de la cabeza humeral es aceptablemente tolerada y puede ser un resultado aceptable en pacientes con baja demanda funcional.

Además de los factores mencionados previamente, otros autores han destacado factores novedosos que implican un peor pronóstico de cara a realizar osteosíntesis, como son la presencia de fractura-luxación en 4 fragmentos, ausencia de fragmento cefálico asociado a la cabeza, ausencia de sangrado intraquirúrgico del fragmento cefálico, fragmento cefálico con altura <2cm, arrancamiento capsular del fragmento cefálico, sexo femenino o tiempo >48 horas entre fractura y cirugía (↑x5 riesgo de necrosis) [Schnetzke et al., 2018; Gavaskar et al., 2022].

La necrosis avascular de la cabeza humeral puede ser clasificada en cinco estadios según Cruess, y se acepta que todos ellos pueden ser manejados de manera conservadora inicialmente, especialmente los estadios I y II, pudiendo dar buenos resultados sin necesidad de otros gestos terapéuticos [Cruess, 1978; Wen Qiang et al., 2022].

Existen otros factores anatómicos ajenos a las preguntas clásicas de Hertel, y que van relacionados con las contraindicaciones absolutas y relativas de los distintos tipos de artroplastia ya mencionados. En general, la decisión terapéutica en estas fracturas es controvertida y puede resultar un reto [O'Donnell y Cage, 2021; Sabzevari et al., 2023].

Por una parte, es necesario evaluar el estado del manguito rotador en ciertos casos, en tanto que el buen funcionamiento del mismo será crucial en técnicas como la osteosíntesis y, sobretodo, las artroplastias convencionales de hombro, tanto parciales como totales. En casos en los cuales el manguito rotador se encuentre degenerado (estadios avanzados de la clasificación de Goutallier ± modificada de Fuchs con resonancia magnética) o con roturas irreparables, la técnica de elección podría ser la artroplastia invertida de hombro, ya que, como se ha comentado previamente, esta técnica cambia las solicitaciones biomecánicas del hombro [Goutallier et al., 1994; Fuchs et al., 1999, Somerson et al., 2016]. Para que esta prótesis funcione correctamente es indispensable una buena funcionalidad del deltoides, de modo que estará contraindicada en lesiones del mismo, del nervio axilar o en alteraciones óseas de los apoyos del arco de palanca del mismo, es decir, del acromion o la glena, además de en infecciones activas del hombro [Familiari et al., 2018]. Respecto a la disfunción del deltoides, algunos autores defienden que una disfunción moderada del mismo puede ser tan solo una contraindicación relativa, siempre y cuando el paciente entienda que esta medida será paliativa para el control del dolor y que, por tanto, la prótesis no permitirá una buena movilidad [Läderrmann et al., 2013].

Hay cierta tendencia a que, ante la duda, se imponga la osteosíntesis, ya sea con placa y tornillos o clavo endomedular, frente a la artroplastia en fracturas límite, dado que un fracaso de la primera siempre permitirá un procedimiento de rescate con la segunda, pero no al revés.

Con respecto a la comparación del enclavado endomedular frente a la placa con tornillos (por ejemplo, tipo Philos como paradigma de estos sistemas de osteosíntesis), el debate es largo. En líneas generales, todos los artículos y metaanálisis avalan similitud de resultados en ambas técnicas en lo que se refiere a tasas de unión, éxito en la reducción, afectación de nervio radial y tasa de infecciones, considerándose que el enclavado endomedular podría ser una buena técnica, especialmente en fracturas sin desplazamiento de las tuberosidades [Martinez-Catalan y Boileau, 2023]. Algunos autores argumentan que el enclavado se asocia a una mayor tasa de dolor en hombro post-quirúrgico y otras complicaciones que conducen a una segunda cirugía, por ejemplo, el aflojamiento de los tornillos [Ouyang et al., 2013; Zhao et al., 2015], mientras que otros defienden esta técnica por dar resultados clínicos similares con menores tasas de sangrado, complicaciones, tiempo quirúrgico, reintervención y mala angulación, y aducen que la omalgia residual es secundaria a una mala técnica muchas veces [Muccioli et al., 2020; Bu et al.,

2021]. Hoy en día ambas técnicas tienen una incidencia ascendente, aunque hay cierta tendencia a reservar el enclavado para pacientes con más comorbilidades [Burgmeier et al., 2021].

Respecto a los tornillos canulados percutáneos, esta técnica quedará ceñida a la indicación de fracturas simples en dos fragmentos en las cuales se pueda realizar una síntesis perpendicular al trazo de fractura en un hueso esponjoso de buena calidad.

En resumidas cuentas, los perfiles y estereotipos más claros que podríamos asignar a los distintos tratamientos de fracturas de húmero proximal serían:

- Tratamiento conservador: fracturas con escaso desplazamiento (<0,5cm entre fragmentos), pocos fragmentos y escasa demanda funcional, sin factores de riesgo de isquemia de la cabeza, con buena alineación y bisagra medial preservada. Primera elección en casos de roturas de manguito e insuficiencia del deltoides combinadas. No obstante, cabe mencionar que existen múltiples estudios que defienden que no existen diferencias entre el tratamiento conservador y quirúrgico en cuanto resultados a medio plazo, sin hacer diferencias entre el patrón de fractura, especialmente en pacientes mayores a 60-65 años [Rangan et al., 2015; Beks et al., 2018; Handoll et al., 2022].
- Osteosíntesis: fracturas con desplazamiento de fragmentos (>0,5-1cm) en paciente joven y sin factores de riesgo para la vascularización de la cabeza, con manguito rotador sano.
- Hemiartroplastia de húmero proximal: fracturas de gran calado con factores de riesgo de isquemia y glena sin signos degenerativos en el contexto de un manguito rotador sano.
- Artroplastia total anatómica de húmero proximal: no existen indicaciones para su uso en la actualidad demostradas, dada la superioridad manifiesta de la artroplastia invertida.
- Artroplastia invertida de húmero proximal: paciente con fractura de gran calado con factores de riesgo de isquemia y glena con stock óseo suficiente en el contexto de manguito rotador degenerado con un deltoides funcional y sin otras contraindicaciones asociadas, sobretodo en ancianos [Jobin et al., 2015]

En general, tanto en el tratamiento conservador como en el quirúrgico se aboga por una rehabilitación precoz. En un estudio, se vio que existe una tendencia a una rehabilitación más “agresiva” entre los subespecialistas en “osteosíntesis” que en los de “hombro y codo”, siendo recomendables nuevos estudios para establecer un estándar homogéneo [Patch et al., 2022].

Existen otras técnicas para el tratamiento de estas fracturas como son las agujas, aunque actualmente han quedado relegadas a un uso muy puntual en casos muy concretos, dada la alta tasa de complicaciones graves por migración de las mismas. Tienen la ventaja de ser poco invasivas y, a diferencia de los tornillos percutáneos, no dependen de un buen hueso esponjoso estrictamente hablando (aunque esto sea siempre una ventaja), dado que su anclaje es cortical

En la [Tabla 2](#) se puede apreciar de forma resumida las ventajas, desventajas y contraindicaciones absolutas de los distintos tratamientos planteados hasta ahora:

Método	Indicación (fracturas)	Contraindicaciones	Ventajas	Desventajas
<b>Conservador</b>	Cualquiera según muchos estudios Sobretodo ancianos	- Lesión neurológica (explorar) - ¿<65 años? - Desplazamientos o inestabilidad inaceptable	- Evitar iatrogenia - Resultados aceptables	- La consolidación biológica puede ser insuficiente
<b>Placas de osteosíntesis</b>	Fracturas con desplazamiento y sin criterios de riesgo de necrosis avascular	- Infecciones en zona de acceso - Criterios de isquemia de la cabeza humeral	- Recuperación rápida	- Acto quirúrgico per sé - Técnicamente demandante - Colapso de fragmentos y cut-out de tornillos
<b>Clavos endomedulares</b>	Fracturas sin afección de tuberosidades Fractura abierta con compromiso neurovascular o de partes blandas Politraumatismo Fracturas patológicas	- Fisis abiertas - Lesión del nervio radial o no explorable por bajo nivel de consciencia (explorar radial) - Criterios de isquemia de la cabeza humeral - Split cefálico no reducible - Desplazamiento severo de las tuberosidades - Infección activa - Canal estrecho	- Poco invasivo (útil en grandes lesiones de partes blandas o ancianos con comorbilidades) - Estabilizador en lesiones óseas (tumores) - Mejor agarre en hueso osteoporótico	- Migraciones de tornillos - Dolor en manguito rotador - Fracturas perimplante - ¿↑ Lesión nerviosa? - Exposición radiológica alta
<b>Tornillos percutáneos</b>	Fracturas desplazadas con trazos simples	- Lesión neurológica - Inestabilidad cervicodifisaria - Criterios de isquemia de la cabeza humeral	- Movilización precoz - Poco invasivo	- Alto riesgo de desplazamiento secundario
<b>(Pinning/aguja)</b>	¿Infancia o Ancianos?	Técnica denostada en la actualidad para fracturas. Elevadas complicaciones con malos resultados		
<b>Hemiartroplastia</b>	Cirugía de salvamento de osteosíntesis fallida Fracturas muy conminutas con manguito sano	- Infección activa - Defectos de la glena - Manguito alterado - Artropatía asociada	- Buena recuperación - Rescatable con prótesis invertida	- Demandante técnicamente - Alta tasa de fallos en la reducción
<b>Total anatómica</b>	Ninguna	Técnica denostada en la actualidad para fracturas		
<b>Artroplastia total invertida</b>	Manguito disfuncional Salvamento de otros procedimientos fallidos	- Infección activa - Parálisis del deltoides - Defectos de nervio axilar - Glena osteoporótica	- Recuperación rápida - Mejores resultados funcionales que resto de técnicas quirúrgicas	- Luxaciones - Aflojamiento - Difícil rescate - Notching

Tabla 2. Resumen sobre las distintas técnicas disponibles para el tratamiento de las fracturas de húmero proximal [Hessmann et al., 2012; Kancherla et al., 2017; Baker et al., 2022] *Tratamiento conservador* // *Métodos de osteosíntesis* // *Artroplastias*

## **I.3. Impresión 3D**

### **I.3.1 Antecedentes históricos**

Los primeros antecedentes de la impresión 3D surgen en Japón a principios de los años 80 del pasado siglo de la mano de Hideo Kodama, quien desarrollara una técnica de impresión en 3D que utilizaba un rayo láser para solidificar capas de fotopolímero, siendo conocido este sistema de manufacturación aditiva en sus inicios como “Rapid Prototyping”.

En Estados Unidos, Chuck Hull desarrollaría en 1983 un primer prototipo de impresora 3D a través de la creación de una nueva tecnología: la estereolitografía. Un año después fundaría su propia empresa (RP Systems), pero no sería hasta 1986 cuando conseguiría una primera patente viable de su modelo, que acabaría llamando SLA-1 y que terminaría de pulir finalmente en 1987.

Paralelamente a las investigaciones de Hull, Deckard publicaría en 1987 sus hallazgos respecto a la tecnología SLS (Selective Láser Sintering), y Crump hablaría de la técnica de fundido de capas dos años después. Todos estos hallazgos constituyen los cimientos de la actual impresión 3D.

Durante las siguientes dos décadas, la progresión de esta tecnología se vio estancada, en tanto que las patentes seguían vigentes y era una tecnología cara y solamente accesible para grandes empresas. Sin embargo, a principios del presente siglo, una vez fueron expirando las patentes, surgieron dos movimientos que darían lugar al gran boom actual de esta tecnología que actualmente estamos viviendo

Por una parte, el movimiento RepRap (Replicating Rapid Prototype) surgió en 2005, con el objetivo de desarrollar impresoras 3D de código abierto, basándose en la teoría de Bowyer de que una impresora 3D podía ser capaz de imprimir y replicar componentes que constituyeran la estructura básica de otra. Múltiples investigadores se unieron a este movimiento de código abierto, lo cual ha permitido el rápido desarrollo de esta tecnología en el presente siglo.

Paralelamente, surgiría el movimiento Crowdfunding, consistente en recaudar fondos de pequeños inversores a cambio de obsequios o participaciones en pequeñas empresas en lanzamiento o “start-ups”. La impresión 3D se uniría a esta nueva ola, y de ella surgirían muchas nuevas impresoras rudimentarias y filamentos.

En todo este contexto de desarrollo rápido y diversificado de esta tecnología, aparecen empresas sólidas que establecen modelos de impresora en 3D fácilmente reproducibles y a bajo coste, como la de Josef Prusa en 2010 en República Checa, además de nuevos software de código abierto que facilitan el proceso de impresión 3D, como los desarrollados por la empresa Ultimaker (Países Bajos, 2011), la cual produce también impresoras con el sello Medical Device, siendo probablemente las más usadas en el ámbito que nos ocupa hoy día [Horvath, 2014; Kholgh Eshkalak et al., 2020; Aldawood, 2023].

### I.3.2 Antecedentes en Medicina y traumatología

Los primeros usos de impresión 3D en medicina fueron desde lo simple y rudimentario, desarrollándose, por ejemplo, implantes dentarios en los años 90, o un modelo de una pierna protésica en 2008. Sucesivamente, esta tecnología se ha enfocado a hitos más complejos. Es una tecnología cada vez más investigada en medicina, como se puede ver en la [Figura 19](#).

En 2015 se produce un hito, ya que por primera vez la FDA autoriza el uso de un fármaco (Spritam - Levetiracetam, con efectos antiepilépticos) que es procesado mediante técnicas de impresión 3D, existiendo en la actualidad múltiples líneas de desarrollo de fármacos relacionados con esta tecnología [Mohammed et al., 2021]

Esta tecnología también ha sido utilizada, por ejemplo, para crear andamios o “scaffolds” para la proliferación celular en la investigación contra el cáncer. Estos andamios, además, han sido probados para intentar generar injertos tanto de hueso como de cartílago, lo cual ha arrojado resultados prometedores que podrían ser determinantes para la especialidad de cirugía ortopédica y traumatología [Wang et al., 2020; Zhang et al., 2021; Xu et al., 2022; Yazdanpanah et al., 2022].

En el campo de la traumatología, la aparición de nuevas tecnologías de refrigeración que permiten la impresión y pulimentado de metales ha dado lugar a la fundación de empresas de creación de implantes a medida. En los sucesivos años, con el vencimiento de las patentes de refrigeración, se espera que esta tecnología pueda entrar de lleno en algunos grandes hospitales, creando una medicina protésica adaptada a las necesidades del paciente.

Más allá de las mencionadas tecnologías punteras, desarrolladas en laboratorios de alta financiación, la tecnología de impresión 3D ha sido capaz de introducirse en un gran número de hospitales a nivel mundial a través de sus aplicaciones más esenciales, las cuales afectan de lleno a especialidades como la cirugía ortopédica y traumatología o la cirugía maxilofacial.

Un ejemplo de ello es la impresión de modelos para la planificación quirúrgica, permitiendo manipular la anatomía del paciente ex-vivo previamente a la propia cirugía. Sumado a ello, se pueden desarrollar guías de corte personalizadas, que cada vez son más específicas y precisas. Todo ello ha sido posible gracias a la aceptación de diversos materiales como “de uso médico” por la FDA, aunque aún queda mucho por regular [Paul et al., 2018].

Las aplicaciones de desarrollo 3D son sencillas, y se basan en la secuencia: Modelo 3D a través de conjunto de imágenes (por ejemplo, DICOM) → conversión a STL → conversión a G-Code → Impresión del modelo → Post-procesado (si precisa). Es precisamente en esta secuencia en la que se basan la mayoría de estudios de iniciativas emprendedoras por sanitarios particulares, incluida esta tesis, dada su simpleza y accesibilidad. [Kholgh Eshkalak et al., 2020]

Otro rol fundamental es el de enseñanza en el ámbito médico, tanto para pacientes como para médicos, especialmente para residentes en formación. [Aimar et al., 2019]

### I.3.3 Impresión 3D en fracturas de húmero proximal

Las fracturas de húmero proximal, como se ha comentado, constituyen una patología altamente prevalente y con un impacto socioeconómico no desdeñable para los sistemas sanitarios. Es por ello que ha surgido un creciente interés sobre las mismas y han aparecido distintas líneas de investigación basadas en la impresión en 3D.

A principios de los 2000 aparecen algunos artículos que comienzan a hablar de la necesidad de conocer la tridimensionalidad de estas fracturas para poder realizar un mejor diagnóstico y tratamiento de las mismas, planteándose incluso clasificaciones al respecto y la necesidad de realizar un TAC en caso de duda [Edelson et al., 2004; Bahrs et al., 2009].

En la segunda década de este siglo se multiplican los trabajos que hablan de la necesidad de observar tridimensionalmente las fracturas de húmero proximal para mejorar la concordancia interobservador en el diagnóstico de las estas [Feroohar et al., 2011; Ohi et al., 2017; Khanna et al., 2018; Bougher et al., 2020]

Respecto a la impresión de modelos en 3D en esta patología, la evidencia es muy limitada, surgiendo los primeros artículos al respecto en 2016. Entre estos artículos, algunos autores defienden la escasa utilidad de la impresión 3D en este tipo de patología [Spek et al., 2022]. Sin embargo, bajo nuestro punto de vista estos artículos presentan errores en la aleatorización, selección de la muestra y un tamaño muestral que podría hacer que incurrieran en sesgos metodológicos.

Por otro lado, surgen autores que demuestran la superioridad de los modelos 3D para el diagnóstico y/o planificación quirúrgica entre cirujanos para distintas clasificaciones, a destacar HGLS o Neer dependiendo del estudio consultado [Iordens et al., 2016; Cocco et al., 2020; Cocco et al., 2022; Puglisi et al., 2022]. Por todo ello, asumiendo la necesidad de tener un mejor diagnóstico preoperatorio y la premisa de que una mejor concordancia inter e intraobservador supone una mayor fidelidad del modelo con la realidad, los autores del trabajo en que se basa esta tesis consideran necesario ampliar la investigación en este campo. Por ello, pensamos que se puede considerar el Gold Standard a la hora de clasificar fracturas de húmero proximal, en base a la última evidencia disponible hasta el presente estudio [Almirón et al., 2023].

La impresión 3D no sólo ha demostrado una mejora en el diagnóstico, sino en el tratamiento de estas fracturas. En un metaanálisis, los autores demostraron una mejora en distintos parámetros como el tiempo intraquirúrgico, restitución de la anatomía, grado de dolor, movilidad y complicaciones en aquellos pacientes en que se realizó una cirugía de fracturas de húmero proximal asistida con modelos impresos en 3D [Li et al., 2022].

Si bien, aunque esta tecnología se ha mostrado útil, se le pueden atribuir algunos problemas logísticos en torno a ella, tal y como se verá con mayor detalle en el apartado [V.2 Realidad Virtual frente a Impresión 3D](#), y más concretamente en la [Tabla 7](#) del mismo .

## I.4. Realidad Virtual

### I.4.1 Antecedentes: realidad virtual, Metaverso y Oculus

La realidad virtual consiste en una experiencia inmersiva multi-sensorial, que se puede considerar que surge conceptualmente de la mano de Heilig en los años 50. Este cineasta crea el “Sensorama”, una máquina que reproducía imágenes tridimensionales acompañadas de sensaciones de olor, olfato y estímulos hápticos, entre otras. En los siguientes años, Sutherland crearía la llamada “Espada de Damocles”, un casco que reproducía una realidad virtual envolvente teniendo en cuenta los movimientos del que lo portaba. En los siguientes años, esta tecnología se extendería a campos como el entretenimiento (Atari - Battlezone), simulación de vuelo (US AirForce – VCASS) o entrenamiento espacial (NASA) [Cipresso et al., 2022].

En los años 2000 se da la gran explosión de esta industria, centrándose en el entretenimiento y el desarrollo de videojuegos. El buque insignia de esta tecnología sería la empresa Oculus, fundada por Luckey en 2007 y lanzando el primer modelo de gafas de realidad virtual tal y como las conocemos en el año 2012 [Berkman, 2007; Cipresso et al., 2022].

En 2016, Oculus sería adquirida por Facebook, que da un nuevo enfoque a la idea de la realidad virtual y lanza en 2019 las Oculus Quest. Estas serían las primeras gafas del mercado ideadas como dispositivo “all-in-one”, es decir, que no necesitaría de otros dispositivos electrónicos adicionales para su funcionamiento (ordenadores, videoconsolas...). El precio asumible de estas gafas, además de la posibilidad de trabajar en modo desarrollador y la existencia de un código relativamente abierto, han permitido que una gran cantidad de usuarios se lancen a realizar investigaciones en busca de nuevas aplicaciones para esta tecnología.

De este modo, en los últimos años han aparecido múltiples ideas enfocadas a distintos campos técnicos para intentar mejorarlos. Este clima de investigación tiene especial trascendencia el ámbito de la educación, inclusive en la esfera médica, como se puede ver en la [Figura 19](#).

Todo esto es posible gracias al concepto de metaverso, acuñado en 1992 en la novela “Snow Crash” de Neal Stephenson. Este hace alusión a un mundo de realidad masiva en línea, que es en lo que se basan las nuevas tendencias de realidad virtual, las cuales permiten acceder, por ejemplo, a formación de todo tipo desde cualquier parte de una manera inmersiva.

Los primeros ejemplos formativos del metaverso aparecen en programas como Second Life en 2003, donde se crea un mundo virtual con inmersión sobre el monitor del ordenador. Este programa fue uno de los predecesores del uso educativo de las experiencias inmersivas, existiendo incluso estudios al respecto realizados en la UMA [Rudolphi-Solero et al., 2021].

La incursión de Facebook y Microsoft en el mundo de la realidad virtual, sumado a una experiencia más inmersiva, ha creado un nuevo boom formativo en torno al metaverso, o mundo de realidad virtual paralela [Mystakidis, 2022].

## **I.4.2 Antecedentes en Medicina y traumatología**

La realidad virtual se encuentra inmersa de lleno hoy día en el mundo de la medicina y la traumatología, con un rol fundamental en procesos formativos y educativos, dado el gran potencial, por ejemplo, para simular técnicas ex-vivo.

Respecto a la traumatología, se han publicado en los últimos años diversos estudios en torno a la formación mediante realidad virtual en distintos campos. Por ejemplo, un estudio centrado en el entrenamiento virtual de prótesis primarias totales de cadera arrojó resultados prometedores y concluyó que este tipo de entrenamiento podría mejorar el aprendizaje para técnicas quirúrgicas abiertas [Logishetty et al., 2019]. Otro estudio, también versado en este tipo de cirugía, demostró mejorar la habilidad a la hora de implantar este tipo de prótesis en un grupo de residentes de primer año expuestos a un entrenamiento con un simulador de realidad virtual. En este caso, los autores concluyen que la realidad virtual será una herramienta indispensable en la formación quirúrgica [Hooper et al., 2019].

Un estudio sobre entrenamiento de realidad virtual fue llevado a cabo sobre 107 residentes de primer año de traumatología, instruyéndolos en técnicas básicas mediante un simulador artroscópico durante 6 meses. Tras el periodo formativo, el grupo de residentes que había sido sometido al entrenamiento demostró mayor habilidad a la hora de realizar gestos básicos artroscópicos de manera significativa [Walbron et al., 2020].

Otro ejemplo de entrenamiento artroscópico por realidad virtual lo encontramos en el campo de la artroscopia de cadera, con un estudio que demostró una mejoría en las habilidades sobre esta técnica en profesionales que habían sido sometidos a entrenamiento con un simulador específico de realidad virtual [Khanduja et al., 2017].

En otro estudio enfocado a realizar una exposición de la glena, se pudo observar una mejoría técnica de hasta un 570% en distintos grupos de traumatólogos y residentes [Lohre et al., 2020].

Respecto a las fracturas de húmero proximal, existe poca evidencia publicada en torno a las utilidades de la realidad virtual. En un trabajo se realiza una reproducción virtual de modelos de fracturas para realizar una planificación preoperatoria, con buenos resultados y un corto tiempo de planificación prequirúrgica. Esta simulación se realizó sobre monitores de ordenador y se comparó con modelos en 3D, dando resultados de planificación similares con las ventajas de la rapidez de la realidad virtual [Chen et al., 2018].

En otro trabajo, se realiza una comparación entre modelos de impresión 3D y realidad aumentada, entre otros, para comparar la capacidad diagnóstica en fracturas de húmero proximal por distintos métodos, estableciéndose como la técnica con mejor concordancia los modelos impresos en 3D. Si bien, existen ciertas diferencias entre la holografía / realidad aumentada y la realidad virtual, aunque conceptualmente presentan ciertas similitudes [Cocco et al., 2019].

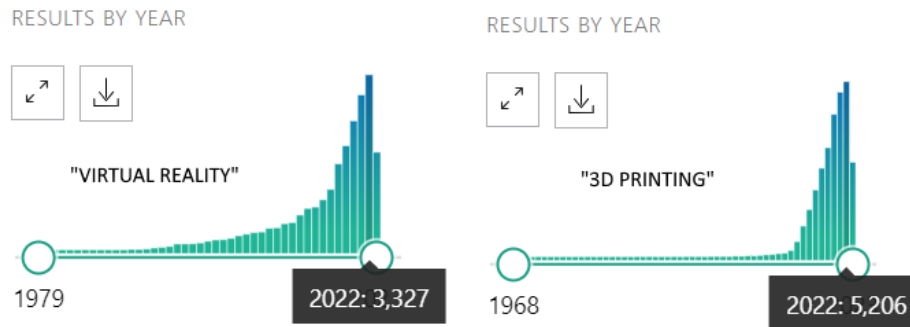


Figura 19. Comparativa de evolución histórica de la investigación en torno a los conceptos de “3D printing” y “Virtual Reality”. 3D printing tiene un origen 11 años previo y actualmente casi duplica el número de artículos respecto a “Virtual Reality”. Fuente: Medline Pubmed.

### I.4.3 Software específico: Unity y SideQuest

Para el desarrollo de este proyecto fue necesario crear un entorno virtual en el cual desempeñar la tarea de clasificar húmeros. Se creó un entorno basado en el motor gráfico Unity 3D 2020.3.26 LTS de Unity Technologies (Copenhague, 2004). Se profundizará en el desarrollo del entorno en el apartado “[III.6.1 Desarrollo del entorno gráfico en Unity](#)”.

Existen antecedentes de proyectos educativos en traumatología basados en Unity3D, los cuales han sido diseñados con la idea de ser reproducidos en dispositivos de realidad virtual mixta y entornos de interacción háptica [Condino et al., 2018]. Como ejemplo, se puede hablar de un simulador para epiduroscopia, con resultados formativos prometedores [Ko et al., 2019]. También se han desarrollado softwares mediante esta tecnología para la formación quirúrgica en otras áreas, como la cirugía cardíaca y torácica [Turini et al., 2017].

Además, permite también la creación de simuladores orientados hacia técnicas invasivas no quirúrgicas que requieran de una curva formativa, sin perjudicar a pacientes durante la progresión de esta curva. Un ejemplo de ello es un simulador desarrollado para el entrenamiento de las punciones epidurales [Moo-Young et al., 2021].

Otros autores han encontrado aplicaciones en el campo de la visualización de imagen médica, creando simuladores específicos basados en esta tecnología para poder observar imágenes médicas de todo el cuerpo humano [Wheeler et al., 2018].

Como mencionado previamente, gran parte del éxito de la realidad virtual radica en la facilidad de actuar a modo de desarrollador en las gafas con tecnología Oculus. SideQuest es una plataforma independiente que permite gestionar, compartir y volcar aplicaciones de desarrollo propio en el dispositivo Oculus que se desee.

Así, a través de la plataforma SideQuest se descargó e instaló este Software en el dispositivo Oculus Quest 2 con el cual fue llevado a cabo el experimento. Esta aplicación se desarrolla de manera independiente y estará disponible para su uso abierto próximamente.

### II. Justificación y objetivos

Los modelos impresos en 3D se han mostrado como efectivos para el correcto diagnóstico de las fracturas de húmero proximal, erigiéndose como el Gold Standard en muchos estudios (hipótesis nula). No obstante su uso puede verse limitado por la necesidad de manejo de tecnologías especializadas y un aumento de tiempo de preparación quirúrgica, secundario principalmente al proceso de impresión. Además, el uso de plásticos no resulta un método ideal en el contexto de la sostenibilidad medioambiental.

Otras desventajas de la impresión 3D residen en las necesidades espaciales para la constitución de un laboratorio de impresión 3D, la tasa de fallo en la impresión y los sobrecostes secundarios al gasto de material y electricidad, entre otros.

La realidad virtual podría ser considerada como una nueva herramienta en el flujo diario de trabajo del Cirujano Ortopédico y Traumatólogo. Esta tecnología ha sido utilizada para distintos fines en traumatología, y más concretamente en la subespecialidad de cirugía de codo y hombro, como ya se ha descrito en la introducción, principalmente con objetivos formativos y educativos.

Sin embargo, hasta donde se sabe, no existe bibliografía previa sobre la efectividad de la Realidad Virtual a la hora de clasificar las distintas fracturas de húmero proximal. En tanto que la realidad virtual no precisa de la existencia de un modelo físico, esta podría suponer una alternativa a la impresión 3D sin las desventajas previamente expuestas de la misma.

El **objetivo principal** del presente trabajo es proponer la instauración de la realidad virtual como una nueva arma dentro del arsenal de los cirujanos ortopédicos y traumatólogos para poder clasificar correctamente las fracturas de húmero proximal de cara a una mejor planificación de su tratamiento sin los inconvenientes de los modelos impresos en 3D (hipótesis alternativa).

Así, se estudiará la tasa de acierto en una serie de observaciones de húmeros proximales realizadas por residentes de cirugía ortopédica y traumatología de distintos grados de formación y centros hospitalarios aleatorizados entre dos grupos: realidad virtual o modelos impresos en 3D. De este modo, se pretende demostrar no inferioridad en la tasa de acierto utilizando realidad virtual al compararse frente al Gold Standard, siendo así la realidad virtual una alternativa válida a los modelos impresos en 3D sin las desventajas inherentes a ellos.

Se aceptó como respuesta correcta aquella coincidente con la dada por un Comité de Expertos previamente (se comentará en el apartado [III.3 Clasificación Gold Standard – Comité de Expertos](#)), utilizando como clasificaciones la de Neer y HGSL por su sencillez, reproducibilidad y buena tasa de concordancia demostrada en otros estudios.

Además, se pretende evaluar como **objetivo secundario** otras variables como el grado de utilidad o satisfacción percibida utilizando las distintas tecnologías



### III. Material y métodos

Esta tesis está basada en un estudio aprobado por el Comité de Ética de Investigación Provincial de Málaga, con referencia #0171-N-22. (Ver [VIII.5. Certificado del Comité Ético](#)).

El diseño del estudio se basó en un formato de ensayo clínico aleatorizado, con la salvedad de que se evaluaron métodos diagnósticos en vez de tratamientos o intervenciones.

#### III.1. Obtención de la muestra de húmeros proximales

La muestra objetivo del estudio fue todo paciente con una fractura de húmero proximal en los últimos 10 años en el hospital comarcal de Antequera al cual se le realizara un TAC y cumpliera los criterios de inclusión establecidos sin tener criterios de exclusión, a saber:

- Criterios e inclusión: 1) Paciente con fractura de húmero proximal en los últimos 10 años con TAC solicitado e indexado en la base de datos radiológica del hospital de Antequera con al menos 80 cortes en una secuencia – “PACS pesado” o Phillips Vue PACS Client, 2) tratado y seguido en Hospital de Antequera y 3) En el momento inicial firmó un consentimiento informado en el cual consentía el uso de sus imágenes médicas con fines de investigación bajo anonimato.
- Criterios de exclusión: patologías previas en el hombro afecto, ya sean fracturas o antecedentes de luxaciones que puedan haber generado una alteración morfológica previa en la cabeza humeral.

En Phillips Vue PACS Client – Carestream se accedió al servidor local del Hospital de Antequera y se introdujo en el apartado “prueba diagnóstica” el texto “T.C. sin Contraste I.V. de hombro”, obteniéndose un total de 63 casos, de los cuales acabaron ajustándose a los criterios establecidos un total de 34 casos ([Figura 20](#)).

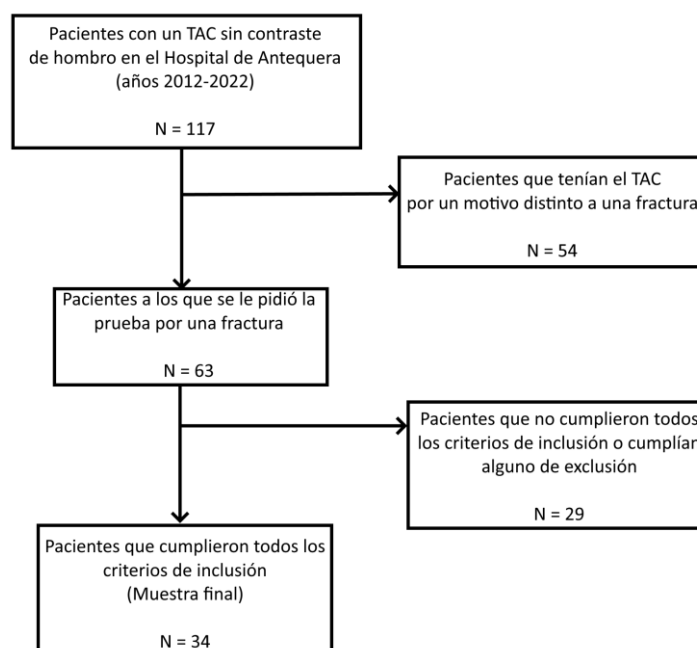


Figura 20. Diagrama de flujo sobre el proceso de inclusión y exclusión de casos en el estudio. Los detalles sobre los criterios de inclusión y exclusión se relatan en el texto.

Estos 34 escáneres fueron realizados en un Tomógrafo Axial Computarizado modelo SOMATOM Emotion 16-slice 2007 (Siemens). Las imágenes de cada uno de los casos fueron descargadas y tratadas como formato DICOM.

De todos los pacientes que entraron en el estudio, 18 de ellos tuvieron fracturas de húmero izquierdo y 16 de ellos fracturas de húmero derecho. La lateralidad de las fracturas sería revelada a los distintos encuestados, como se relatará más adelante, para no perder las referencias anatómicas pertinentes.

## III.2. Obtención de participantes encuestados

La muestra de entrevistados estuvo constituida sola y exclusivamente por residentes de traumatología de distinto grado de formación y distintos hospitales de Andalucía. Para ello, se tomaron inicialmente residentes de los Hospitales Virgen de las Nieves (Granada), Hospital Clínico Universitario Virgen de la Victoria (Málaga) y Área Sanitaria Norte de Málaga – Hospital de Antequera. Estos hospitales fueron considerados respectivamente de tercer, segundo y primer nivel según los criterios de la WHO-CHOICE comentados en el apartado [1.1.2 Formación especializada en España. Niveles hospitalarios](#).

Inicialmente, la población diana fue de 37 residentes, aunque finalmente el estudio contó con 36 participantes por imposibilidad de participación de uno de los residentes por motivos técnicos. Así, la población del estudio fue  $n = 36$ , con 25 participantes varones frente a 11 mujeres y con una media de edad de 27.75 años. Todos los participantes firmaron un consentimiento tipo, que se puede ver en el [Anexo VIII.2 Consentimiento Informado a los entrevistados](#).

Cada uno de los residentes fue sometido a una aleatorización pura por sorteo extrayendo de una bolsa un papel en el que podía ser dirigido al grupo “Impresión 3D” (Modelos Impresos en 3D) o al grupo “VR” (Modelos expuestos en Realidad Virtual). El número de papeles dentro de la bolsa fue de ocho, habiendo cuatro para cada una de las dos opciones. La bolsa fue de tela opaca. Todos los papeles tenían exactamente el mismo tamaño, forma y textura. En la [Figura 21](#) se pueden apreciar la bolsa y los papeles utilizados.

Una vez extraído el papel, existió reposición, es decir, el papel se volvió a introducir dentro de la bolsa de tela para que siguiera existiendo una aleatorización pura, es decir, un 50% de posibilidades de que cada uno de los participantes perteneciera a los distintos grupos.

El sistema de aleatorización fue incluido en la solicitud ética del estudio, y consensado previamente con expertos en estadística que dieron como válido el sistema de aleatorización. Además, antes de iniciar el estudio se comprobó la aleatoriedad del sistema solicitando a cuatro personas ajenas al estudio realizar el proceso de extracción con reposición un total de 200 veces (50 veces por cada voluntario), obteniéndose en un total de 102 veces una asignación al grupo “VR” y un total de 98 asignaciones al grupo “Impresión 3D”, lo cual demuestra la aleatoriedad, ya que esta mínima diferencia puede ser atribuible al azar.

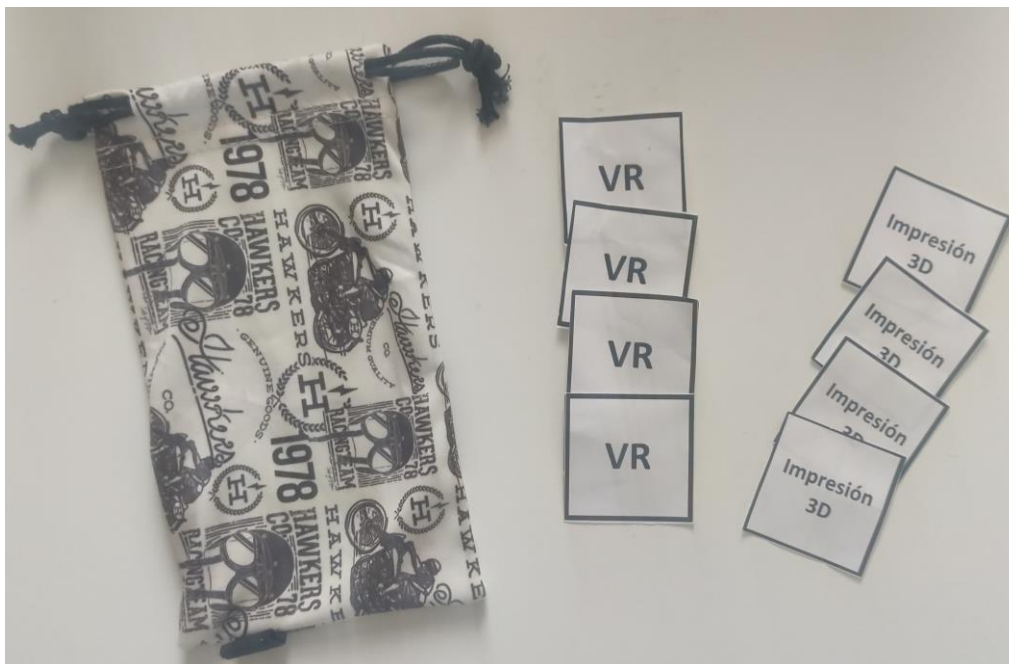


Figura 21. Sistema de aleatorización pura para cada uno de los participantes del estudio. Bolsa opaca y papeles de asignación a los distintos grupos equivalentes en número y características. Asignación mediante aleatorización simple con reposición.

### III.3. Clasificación Gold Standard – Comité de Expertos

Como se explica en el apartado [1.2.5 Clasificación de las fracturas de húmero proximal](#), existen múltiples formas de clasificar este tipo de fractura, propuestas por muy diversos autores y con nomenclatura variada. De alguna manera, el primero que propuso hacer distinción entre los distintos patrones de fractura fue Codman en 1932, y desde entonces han ido surgiendo nuevos sistemas hasta el día de hoy.

De entre todas las clasificaciones, probablemente la más extendida en la literatura es la de Neer. Históricamente Neer identificó en sus trabajos originales que un fragmento era toda aquella pieza ósea que tenía al menos una angulación de  $45^\circ$  respecto a lo fisiológico o al menos 1 cm de desplazamiento respecto a dónde debiera estar ubicada. Si bien, el propio Neer aseguró en diversas charlas posteriores que estos criterios fueron establecidos por el mismo de una manera en cierto modo arbitraria [Carofino y Leopold, 2013; Schumaier y Grawe, 2018].

Tanto es así que, en la actualidad, muchas de las guías clínicas establecen que sería más correcto ser más exigente a la hora de la reducción de los fragmentos para el buen devenir de la fractura y que, por ello, no sería aceptable poner el límite del desplazamiento en un valor de 1 cm y  $45^\circ$ , siendo más apropiado bajar este umbral hasta los 0,5 cm o  $15^\circ$  y, de este modo, habiendo una mayor tendencia hacia el tratamiento quirúrgico, ya que los criterios establecidos por Neer podrían ser insuficientes de cara a valorar un potencial mal pronóstico de una fractura de húmero proximal. Este criterio tendría especial importancia en las fracturas en 2 fragmentos con rotura del troquíter [Bahrs et al., 2010; Ryan et al., 2022].

Otra clasificación extensamente utilizada por su alta reproducibilidad es la de Hertel o HGLS (Head – Greater – Lesser – Shaft). Esta clasificación ha demostrado una elevada concordancia interobservador e intraobservador, siendo incluso mayor que en el resto de clasificaciones mencionadas en el apartado correspondiente tanto para radiografías simples como para estudios con TAC [Sukthakar et al., 2013; lordens et al., 2016].

Aunque todas las clasificaciones se basan en el concepto de que el húmero está constituido, en esencia, por cuatro grandes estructuras que al fracturarse se separan entre sí, existen sutiles pero importantes diferencias entre cada una de ellas. Sin importar cuál sea el método de clasificación utilizado, la delimitación de los fragmentos y la determinación morfológica del húmero fracturado es crucial para la correcta elección del tratamiento a administrar a cada paciente. Así, hay una imperiosa necesidad de establecer un método que mejore la concordancia interobservador e intraobservador al analizar estas fracturas, todavía pobre [Bruinsma et al., 2013]. Por todo lo previamente expuesto y la evidencia disponible al respecto, en el experimento realizado se propuso a los residentes que clasificaran cada una de las fracturas tanto por el método de Neer como por el de HGLS, con buenas tasas de concordancia en general.

Una vez elegidas las clasificaciones más propicias para la prueba, faltaba por establecer qué tipo de fractura tenía cada uno de los 34 modelos presentados, es decir, cuáles eran “clasificaciones correctas”. Para ello, se tomó a un comité de tres expertos que establecerían la clasificación tomada como referencia.

Los tres expertos consultados fueron especialistas en cirugía ortopédica y traumatología que realizaban su ejercicio profesional en el Hospital de Antequera. Los expertos presentaban un amplio recorrido en cirugía de miembro superior, con una experiencia media operando fracturas de húmero proximal de más de 20 años.

La mecánica de examen sobre el tribunal de expertos fue la siguiente: cada uno de los expertos evaluó de manera independiente y en solitario todas y cada una de las 34 fracturas y las clasificó según Neer y HGLS con unas imágenes representativas de estas clasificaciones exactamente iguales a las que se presentaron a los residentes a posteriori (tanto en el grupo de realidad virtual como en el de modelos impresos en 3D), las cuales aparecen en el apartado [III.4.1 Diseño de las clasificaciones de Neer, HGLS y tratamientos](#). Para realizar esta clasificación, los expertos dispusieron de toda la información necesaria que solicitaran: modelos en realidad virtual, modelos impresos en 3D, radiografías simples, TAC reconstruido, TAC en cortes simples y acceso al expediente clínico anonimizado de cada paciente, incluyendo hojas quirúrgicas y de evolución clínica, para disponer de la mayor cantidad de información posible.

De los 34 modelos, los expertos tuvieron una concordancia total tanto en Neer como HGLS en 30 de los modelos, de manera que en estos 30 se dio como válida la respuesta dada. De entre los otros 4, hubo siempre concordancia entre al menos dos expertos. Tras comentarlo de nuevo a posteriori con los expertos, en los 4 húmeros restantes se acabó acordando que la clasificación más apropiada era aquella en la cual habían coincidido dos de los tres.

Dicho lo anterior, en el presente estudio se considera como respuesta correcta, acertada o concordante a aquella en la cual el diagnóstico, ya sea en Neer o en HGSL, coincide con la respuesta dada por el comité de expertos.

Llegados a este punto es necesario hablar del factor tratamiento. Dado que la ética del estudio no permitía revelar datos sensibles de pacientes, y en tanto que el enfoque original de la idea de este estudio fue puramente de concordancia diagnóstica, consideramos que existe una fuerte limitación del estudio en este punto, y por ello los datos al respecto del tratamiento no fueron publicados en el trabajo original. Esto fue decidido así desde fases pre-experimentales. Esta problemática es apropiadamente explicada a los residentes sometidos al estudio, como se refleja en el apartado [III.5.4 Charla de instrucción previa al cuestionario](#).

Desarrollando el conflicto al respecto, y en base a todo lo explicado sobre la dificultad de la decisión terapéutica y la necesidad de contextualizarla con el paciente en los apartados introductorios, los autores de la presente investigación consideramos poco plausible establecer un tratamiento apropiado para un paciente sin conocer más datos del mismo, que resultarían en revelar información sensible no autorizada por la ética y formato del estudio.

Por tanto, las respuestas dadas para el tratamiento tienen un valor pobre y sometido a un sesgo y, por ello, no han sido publicadas en trabajos previos del autor de la tesis. El único valor que, a nuestro juicio, podrían tener estos datos es establecer una correlación independiente puramente entre el patrón de fractura y la decisión terapéutica, sin considerar más factores, aunque pensamos que podría ser una conclusión poco realista. Los resultados al respecto serán arrojados de forma escueta en el apartado [IV.4 Otros parámetros estudiados: aciertos en el tratamiento, satisfacción y utilidad](#).

Respecto a cuál fue considerado el “tratamiento correcto”, se tomó como tratamiento correcto aquel realizado sobre el paciente en el momento en que se fracturó, obteniéndose este dato directamente de la historia clínica. Consideramos que es un parámetro equivalente a la decisión de Comité de Expertos porque en nuestro hospital las fracturas de húmero proximal de los 10 últimos años siempre han sido intervenidas por la unidad de miembro superior, constituida a su vez por el comité de expertos utilizado para el presente estudio y, en ocasiones, otros adjuntos asociados. En tanto que las decisiones quirúrgicas de la unidad son siempre consensuadas, se acepta que el tratamiento aplicado ha sido fruto de una decisión del Comité de Expertos.

Las opciones de tratamiento ofertadas fueron tratamiento conservador (representado con un cabestrillo), tratamiento mediante osteosíntesis (representado con una placa de osteosíntesis tipo Philos™) o artroplastia (representado con una imagen de una prótesis invertida). Se incidió a expertos y residentes que eran respuestas genéricas, por ejemplo: aunque la imagen dentro de la opción osteosíntesis sea una placa, esta opción hace referencia a cualquier tipo de osteosíntesis con la que se sientan cómodos o familiarizados (clavo, tornillos, agujas, placa con tornillos, cerclajes...).

### III.4. Diseño gráfico del trabajo

#### III.4.1 Diseño de las clasificaciones de Neer, HGLS y tratamientos

Las opciones a elegir tanto para los grupos de realidad virtual como de impresión 3D fueron plasmadas mediante dibujos idénticos en ambos grupos y realizados por el autor de la presente tesis de manera original basándose en los modelos establecidos por Neer y Hertel respectivamente en su momento, al igual que en el caso de las opciones de tratamiento.

El desarrollo de estas imágenes fue realizado mediante una tableta de diseño gráfico Huion H1060P Graphics Drawing Tablet con su propio lápiz inteligente y mediante el software de acceso libre GIMP (versión v2.10.30, Berkeley 1996). Así, a través de un modelo base sin fracturas ni color y con sombras aplicadas mediante pinceles inteligentes, se sometió a la imagen a un tratamiento con distintas capas de color y creando distintos patrones de separación de fractura hasta obtener el total de modelos que fueron finalmente representados a los residentes. Los dibujos referidos a las opciones de tratamiento fueron realizados de manera individualizada con las herramientas gratuitas que ofrece este recurso abierto. Se puede apreciar el set-up de diseño en la [Figura 22](#).

Tanto en la versión en realidad virtual como en la versión en impresión 3D, se trató de plasmar las opciones elegibles de una manera lo más similar posible entre sí en cuanto a orden, para evitar en la medida de lo posible sesgos asociados al orden de las mismas.

En ambos grupos se trató de evitar un sesgo con la lateralidad de los húmeros, pensando en la posibilidad de que si, por ejemplo, sólo representáramos entre las opciones elegibles húmeros derechos, hubiera mayor probabilidad de que se acertara más en el caso de húmeros derechos. Por ello, tanto en el entorno virtual como en el presentado en el caso de los húmeros impresos en 3D, se referenció cada uno de los modelos como derecho o izquierdo y se presentaron clasificaciones de húmeros izquierdos y derechos simultáneamente para que los residentes tuvieran siempre ambas como referencia.

A posteriori, en los respectivos apartados [III.6. Diseño del experimento en realidad virtual](#) y [III.7. Diseño del experimento impreso en 3D](#) se hablará con mayor detalle sobre la lateralidad izquierda-derecha y cómo se desarrolla el experimento.

Los modelos utilizados, agrupados por clasificaciones, se pueden apreciar en la [Figura 23](#) (Clasificaciones de Neer para húmeros izquierdos y derechos), [Figura 24](#) (Tratamientos, estos sin representar lateralidad por considerarse innecesaria y por el escaso peso del tratamiento en la presente tesis y estudio previo por los sesgos posibles previamente mencionados) y [Figura 25](#) (Clasificaciones de HGLS de Hertel para húmeros izquierdos y derechos).

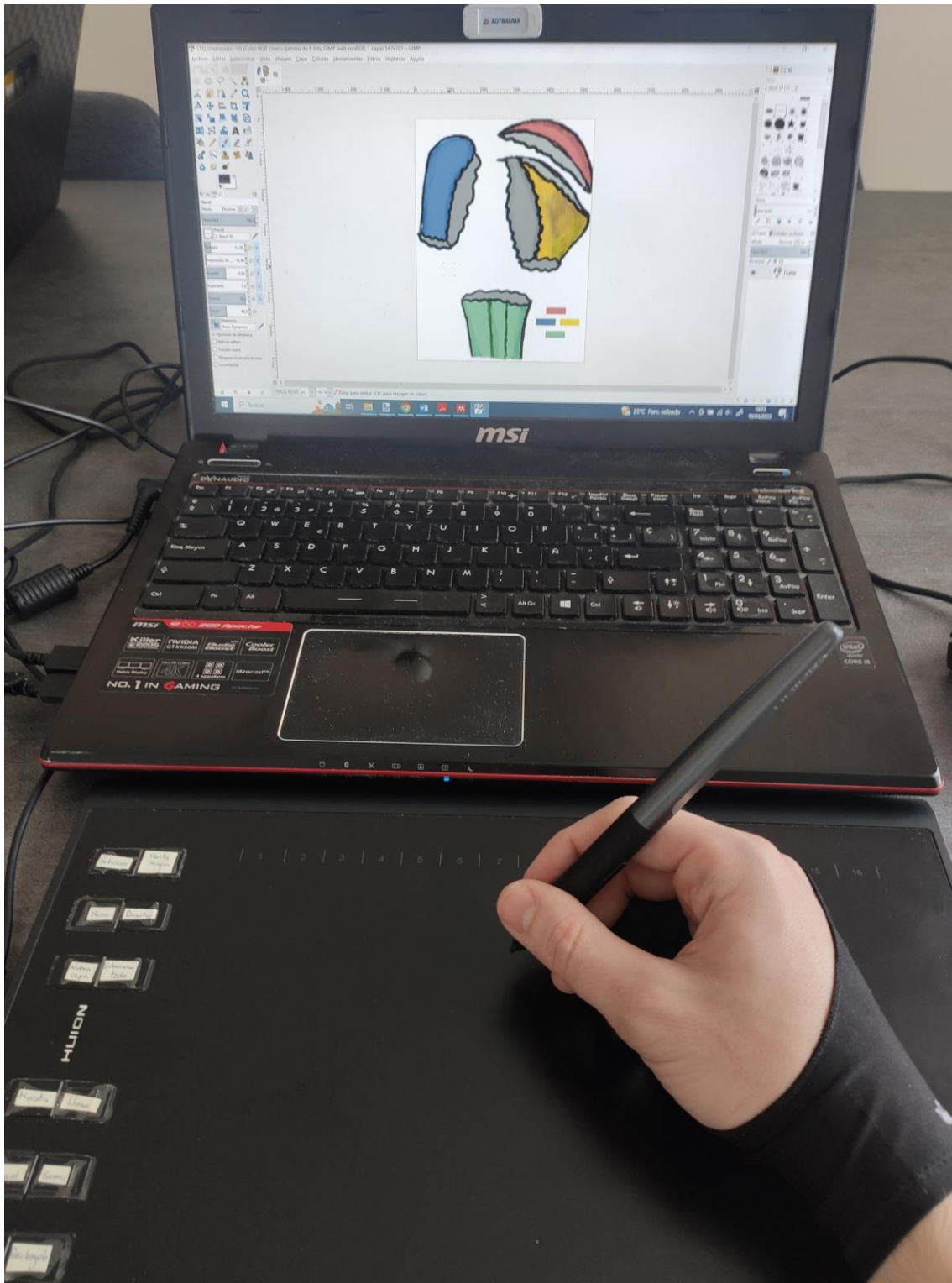


Figura 22. Set-up de diseño gráfico de los distintos elementos gráficos del trabajo. Dibujo realizado sobre Huion H1060P Graphics Drawing Tablet con su propio lápiz inteligente y mediante el software de acceso libre GIMP (versión v2.10.30, Berkeley 1996). Instalación previa de drivers pertinentes. Ordenador MSI GE 602QD Apache con gráfica NVIDIA GTX 950M de motor gráfico de diseño.

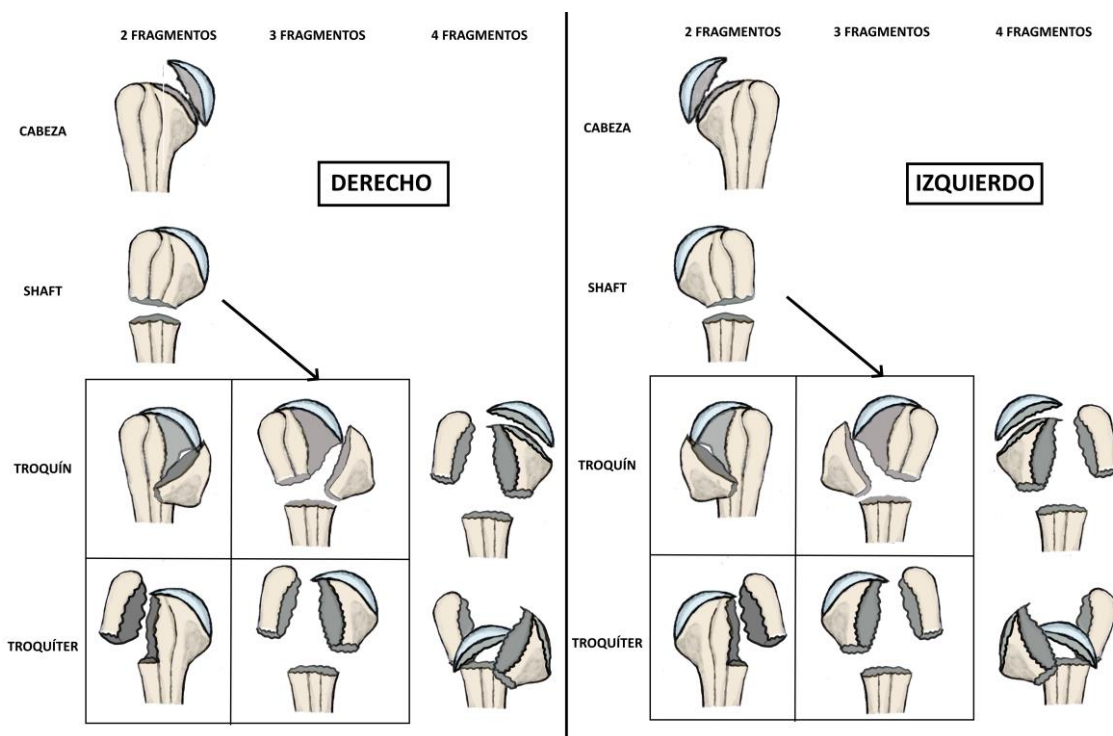


Figura 23. Clasificaciones de Neer para húmeros izquierdos y derechos. Se pueden apreciar las similitudes con la [Figura 7](#) de la Clasificación de Neer. En tanto que en los modelos no se imprimía la escápula y que, por tanto, no se contemplaban las luxaciones, estas han sido suprimidas de la clasificación original, que ha quedado simplificada a Neer 2, 3 o 4, lo cual deberán seleccionar (por tanto, las preguntas de cada húmero sobre Neer tendrán solo estas 3 posibles opciones).

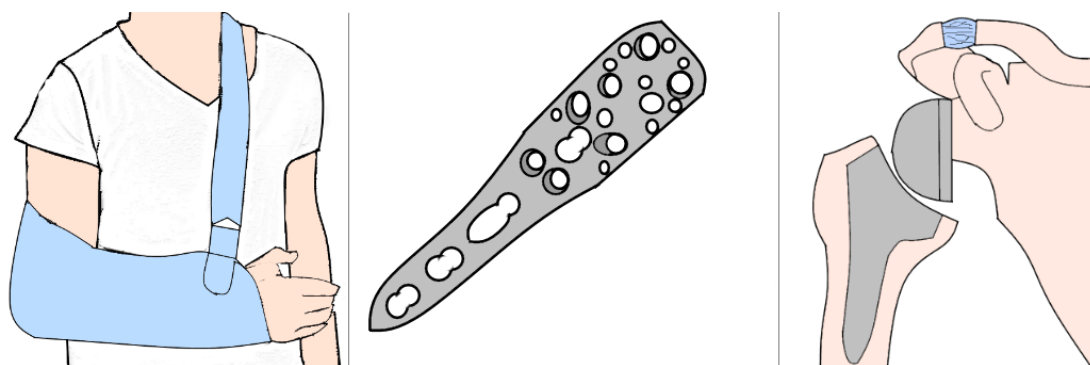


Figura 24. Tratamientos propuestos para las fracturas de húmero proximal. En la imagen a la izquierda se puede apreciar el tratamiento conservador representado como un paciente con un cabestrillo. En la imagen central se puede apreciar una placa de osteosíntesis que hace referencia a cualquier tipo de tratamiento de reconstrucción de la cabeza mediante síntesis (clavos, placas y tornillos, tornillos aislados, agujas...). En la imagen de la derecha se puede observar una representación de una prótesis invertida de hombro que hace alusión a cualquier tipo de tratamiento mediante artroplastia. En este caso no se refleja lateralidad por considerarse redundante y de significación espuria en el estudio. Se explica todo ello a expertos y residentes previamente a la resolución del cuestionario.

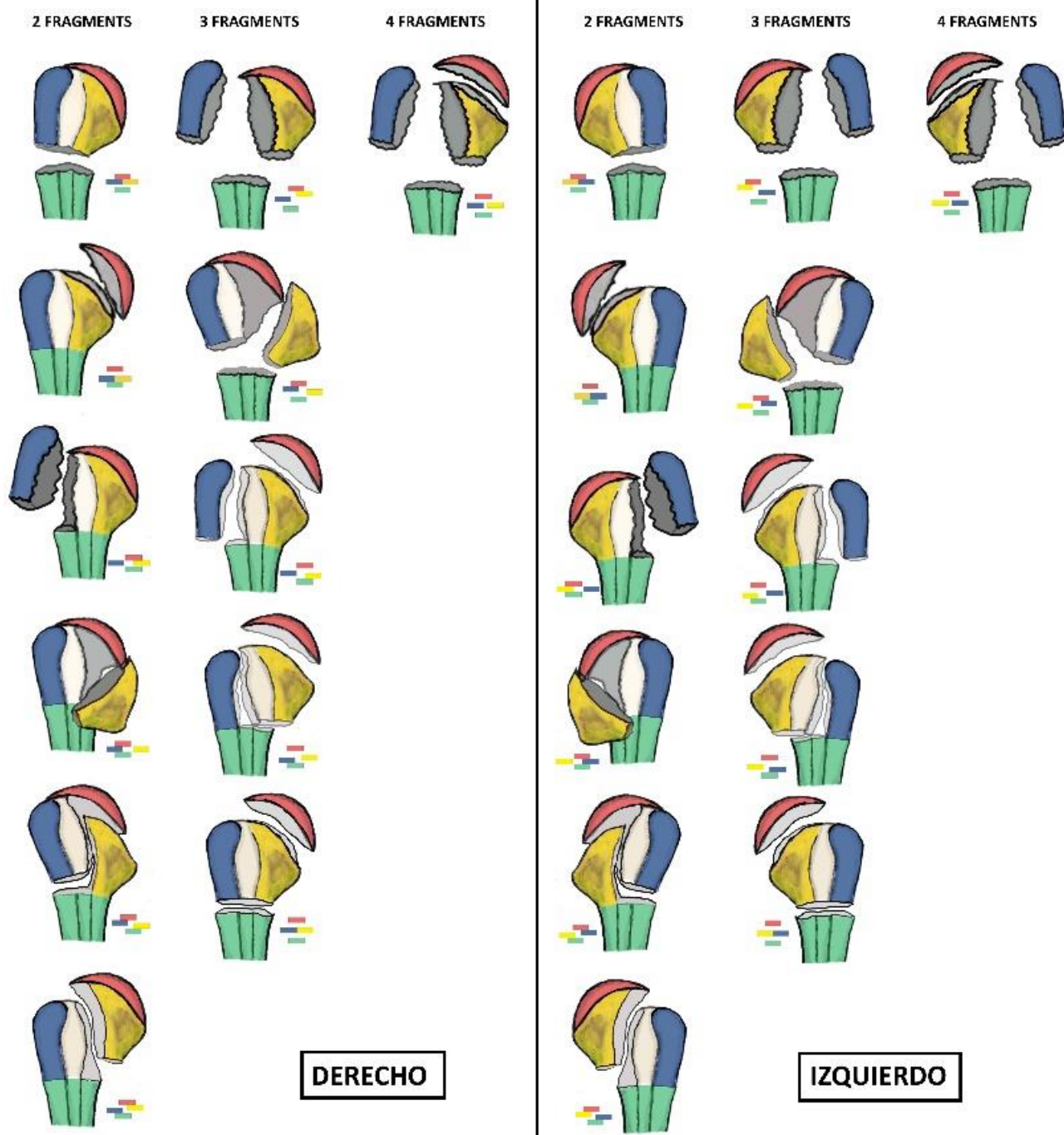


Figura 25. Clasificación HGLS de Codman y Hertel sobre las fracturas de húmero proximal, tanto para húmeros derechos como izquierdos. Se puede apreciar la similitud con la [Figura 8](#) y la [Figura 9](#), originales de sendos autores y sobre las cuales versa este sistema de clasificación. Se realiza una ordenación en base a 2, 3 o 4 fragmentos para una localización más simple de los patrones, y se distribuyen por igual en ambos grupos de la investigación (realidad virtual y modelos en 3D impresos, como se explicará más adelante), aunque se insiste en que deben seleccionar el patrón concreto H-G-L-S (de modo que para HGLS tendrán en cada húmero hasta un total de 12 posibles respuestas).

### **III.4.2 Diseño de húmeros en 3D: InVesalius y Meshmixer**

El primer paso común en el desarrollo de ambos brazos del estudio fue la creación de los modelos en 3D de los húmeros, que a posteriori serían enviados respectivamente al entorno de Unity para el brazo de realidad virtual o a la impresora en 3D para el brazo de modelos impresos.

Inicialmente se acudió a las historias clínicas de los pacientes admitidos finalmente en el estudio y se descargó uno a uno los estudios radiológicos de Tomografía Axial Computadorizada (TAC) a través de la opción “Descargar Examen” de Phillips Vue PACS Client, - Carestream Vue Motion que es la plataforma de soporte de imágenes integrada en Diraya, el cual es a su vez el entorno informático establecido en la asistencia hospitalaria por la Junta de Andalucía para sus hospitales públicos y al cual se tiene acceso, además, desde la sanidad concertada.

Cada uno de los exámenes fue descargado como un archivo comprimido que, a posteriori, fue extraído mediante WinRAR. Al extraer su contenido, se obtienen una serie de archivos que constituyen una secuencia de datos legible, a destacar: todas las imágenes de las secuencias axiales obtenidas en formato jpeg, un archivo de protección tipo lockfile, un archivo de nexos DICOM y otra serie de archivos menores que se integrarán entre sí. Se puede ver cómo quedaban conformados los datos de cada estudio en la [Figura 26](#).

Los archivos DICOM (Digital Imaging and Communication in Medicine) son un formato estandarizado de transmisión y almacenamiento de datos utilizados en dispositivos médicos y que están adaptados para que los softwares preparados para ello sean capaces de leerlos de manera ordenada. Se podría decir que es la guía de ordenación de una secuencia de archivos o imágenes de cara a ser leídos, por ejemplo, por un PACS (Picture Archiving Communication System), que son las siglas que definen a cualquier programa de reproducción de imágenes médicas.

Este sistema de codificación (DICOM) surgió como un estándar que trataba de solucionar los problemas surgidos de los distintos formatos desarrollados por cada casa comercial a la hora de crear imágenes médicas con sus dispositivos. Así, la NEMA (National Electrical Manufacturers Association) y el ACR (American College of Radiologist) lanzan este estándar en los años 80, erigiéndose como sistema estandarizado en los años 90 [Bidgood y Horii, 1992; Parisot 1995].

Por tanto, llegados a este punto sería necesario recurrir a un programa tipo PACS que nos permitiera manipular de manera conjunta esta secuencia de imágenes y datos siendo capaz de interpretar el formato DICOM. En nuestro caso se recurrió a InVesalius 3.1 (CTI Renato Archer, Brazil), un programa que no sólo es capaz de ordenar y reproducir los formatos DICOM, sino que además presenta un algoritmo inteligente capaz de captar las distintas densidades de los tejidos, las cuales se registran entre los datos en base a sus Unidades Hounsfield o de densidad radiológica, y es capaz de establecer una ventana de selección de densidad, excluyendo al resto de tejidos, como se ve en la [Figura 27](#).

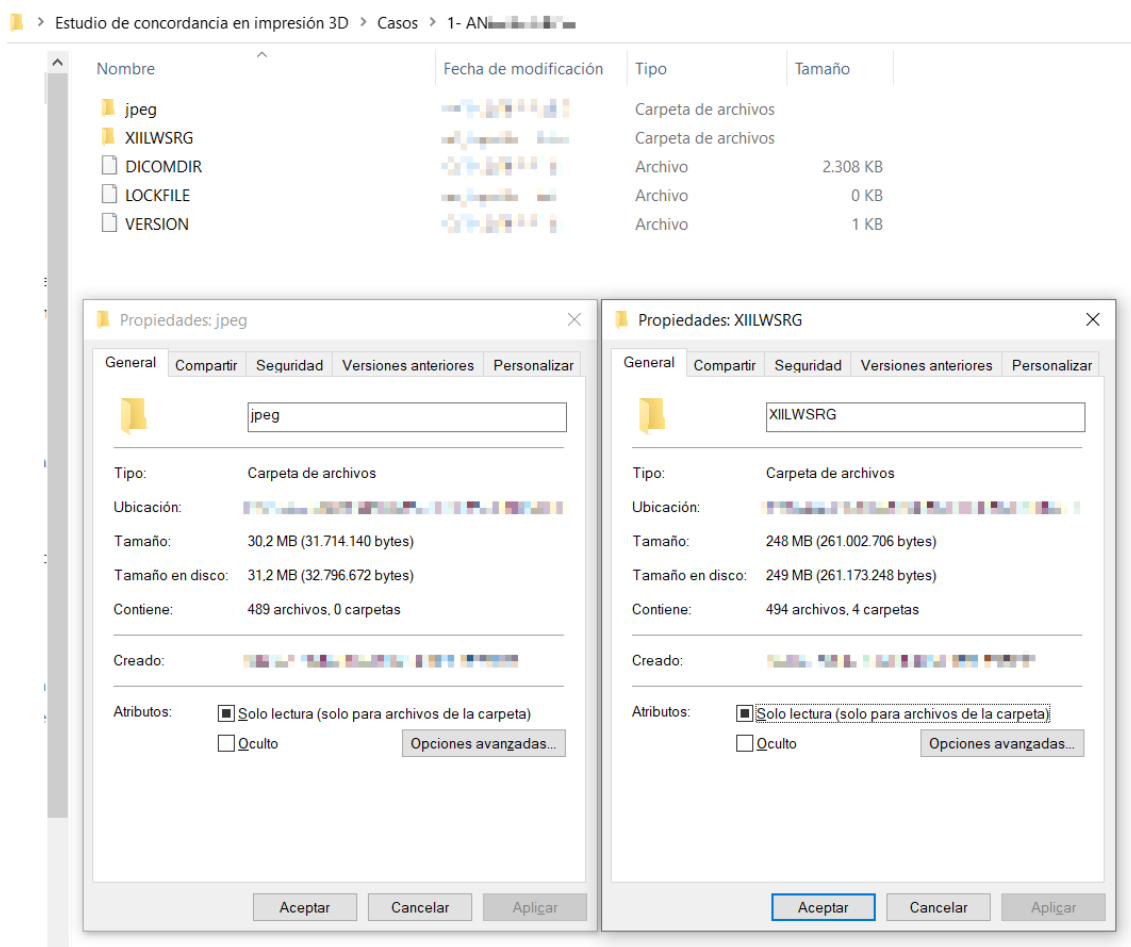


Figura 26. Carpeta y subcarpetas resultantes del formato DICOM. Se puede apreciar un peso aproximado de 280MB por cada estudio, aunque fue variable en función del número de cortes. En la carpeta jpeg aparecieron 489 imágenes de cortes axiales correspondientes a cada uno de los 244 cortes realizados en cada una de las 2 secuencias hechas por el TAC en este caso, dos topogramas que relacionan las imágenes y una última imagen con el informe de dosimetría. En la otra carpeta hay una serie de subcarpetas que contienen archivos sin formato que sirven para correlacionar las imágenes jpeg entre sí. Además, se pueden apreciar los 3 archivos de reconocimiento de formato DICOM para los softwares de lectura.

La gran ventaja que presenta InVesalius es que, a parte de este patrón de elección densidad de ventana semi-inteligente, permite realizar una selección manual imagen a imagen (o rodaja a rodaja según la jerga de la reconstrucción en 3D, basada en el término inglés “slicing”), incluyendo o borrando parte de la información que ha autoincluido el programa para quedarnos finalmente con el tejido diana que se desee. Por ejemplo, en el caso de este experimento se selecciona una ventana con unidades Hounsfield que aludan a hueso, pero, como ya se ha visto en la [Figura 27](#), habrá una cierta tasa de error por parte del programa, que captará artefactos extraños al hueso, también conocidos como ruido o “image noising” y, a su vez, no captará con total precisión todo el tejido óseo cortical.

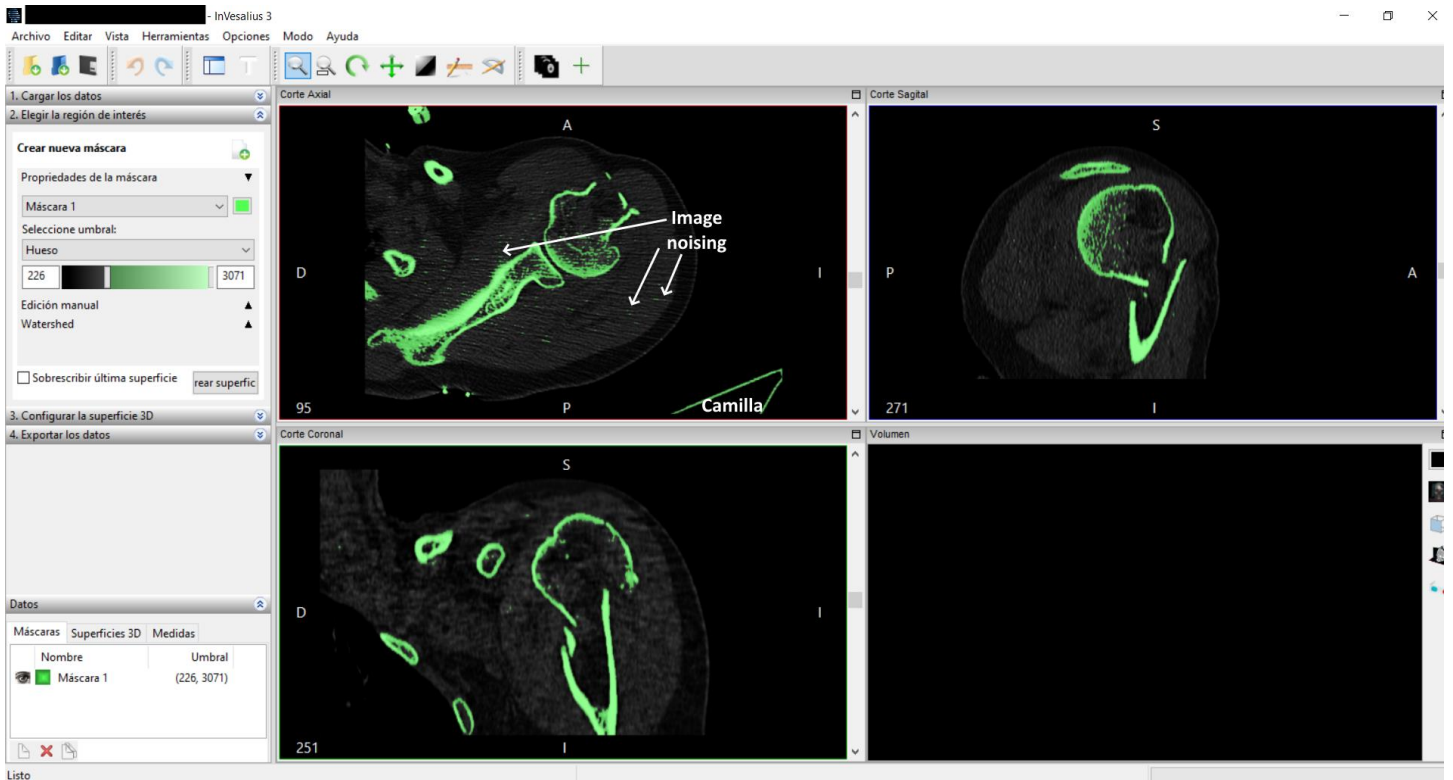


Figura 27. Fase inicial del tratamiento de imágenes DICOM. Se puede apreciar cómo al seleccionar el umbral hueso (menú izquierdo) el programa establece unas unidades Hounsfield en un rango desde las 226 a las 3071 (densidades metálicas, de ahí que se incluya la camilla, como se ve en el corte axial), aunque esto no tiene por qué ajustarse a las densidades reales del hueso de cada paciente, ya que según el hueso y la densidad ósea de nuestros pacientes se debe trabajar en distintos rangos. Por ejemplo, hay autores que han demostrado que algunos huesos osteoporóticos en el TAC pueden tener densidades incluso menores a las 100 Unidades Hounsfield (esto sobre todo ha sido estudiado a nivel vertebral como predictor de osteoporosis alternativo a la densitometría) [Schreiber et al., 2011; Kim et al., 2019; Yaprak et al., 2020]. Tras este punto, se debe realizar una inclusión y/o borrado manual de las partes que falten (hueso esponjoso) o sobren (image noising, camilla...) para el modelo deseado, como se aprecia en [Figura 28](#).

Además, en este tipo de reconstrucciones es recomendable trabajar sobre modelos macizos de base y, aunque los modelos se pueden solidificar con programas que se comentarán a posteriori, es preferible partir de un modelo sólido desde pasos iniciales para evitar problemas más difícilmente solucionables a posteriori. De este modo, se puede ver en la [Figura 28](#) como la selección manual nos permite seleccionar correctamente todo el húmero.

En algunos de los modelos de este trabajo se utilizó un truco para agilizar la dinámica de trabajo y que es visible en la [Figura 28](#), que ha consistido en ser permisivo con los elementos autoseleccionados de manera inteligente por el programa de densidades similares a hueso pero que no estén inmediatamente adyacentes al húmero, y, a su vez, ser exigentes con cualquier elemento con las densidades autoincluidas que esté muy cercano al húmero y que no pretendamos tener en el producto final (impreso o en el entorno de realidad virtual).

Esto se realiza de esta manera porque, como se verá a posteriori, en el siguiente paso del procesado con el software Meshmixer será muy fácil y rápido eliminar elementos no contiguos, pero algo más problemático eliminar los inmediatamente adyacentes, que pueden generar errores difícilmente manejables.

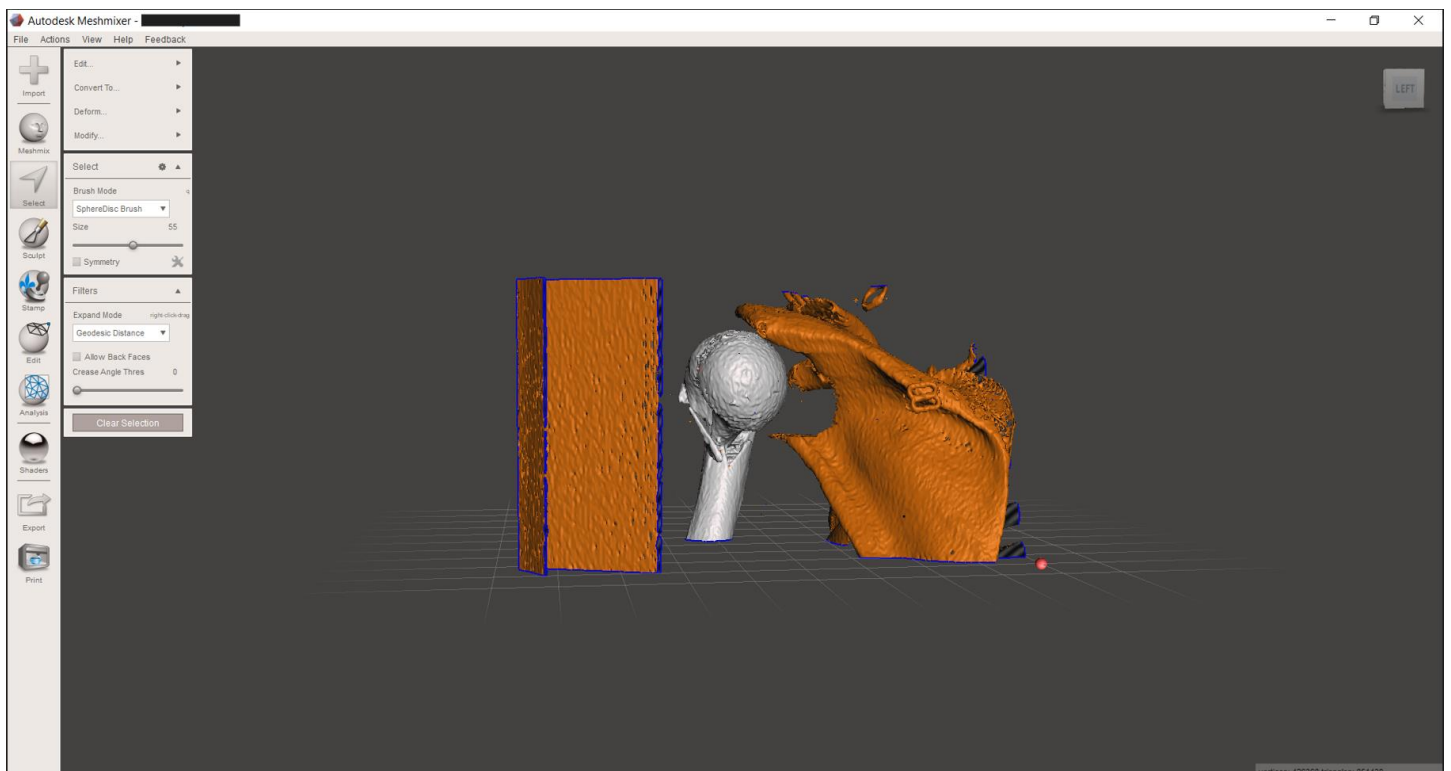


Figura 28. Segunda fase en InVesalius. Se realiza un tratamiento manual según lo descrito previamente en el texto, con dos herramientas disponibles en el menú desplegable de la izquierda, en el subapartado “2. Elegir la región e interés” (se puede ver en [Figura 27](#) desplegado, antes de crear la superficie). Por un lado, se utiliza el borrado de la edición manual para excluir el hueso adyacente que no nos interesa (glena). Por otro lado, se ha usado Watershed capa por capa para elegir “primer plano” o zona de interés y “fondo” o zona que no nos interesa, obteniendo finalmente el modelo que se ve en el cuadrante de abajo a la derecha, y que se exportará en formato STL. Como se ha comentado en el texto, se ha sido poco exigente borrando elementos no adheridos al húmero y mucho borrando elementos adheridos que no nos interesan en la reconstrucción final (glena) Es por ello que en la reconstrucción se puede ver elementos como las costillas, la camilla del TAC o incluso una pinza Kocher plástica que iba adherida a la ropa de este caso. Sin embargo, se ha eliminado todo el ruido cercano y aquellos huesos inmediatamente adyacentes al húmero y que puedan darnos problemas a posteriori, como son la superficie articular de la glena o parte del tejido subacromial.

Finalmente, una vez creada la superficie que nos interesa en InVesalius se exportará el archivo en un formato de manejo tridimensional más utilitario que el DICOM, que está muy restringido al hábito médico. En nuestro caso, se usará el formato de estereolitografía STL (Standard Triangle/Tessellation Language), que es un formato de simplificación del modelo 3D a estructuras poligonales múltiples interrelacionadas más simples, usualmente triángulos.

El archivo en formato STL con exclusión de elementos que puedan interferir en el modelo final es ahora transferible al siguiente paso: Meshmixer v3.5 (Autodesk, 2018), como se establece en los algoritmos de tratamiento en 3D de los modelos de fractura planteados por distintos autores [Moldovan et al., 2021; Ejnisman et al., 2021; Fidanza et al., 2022].

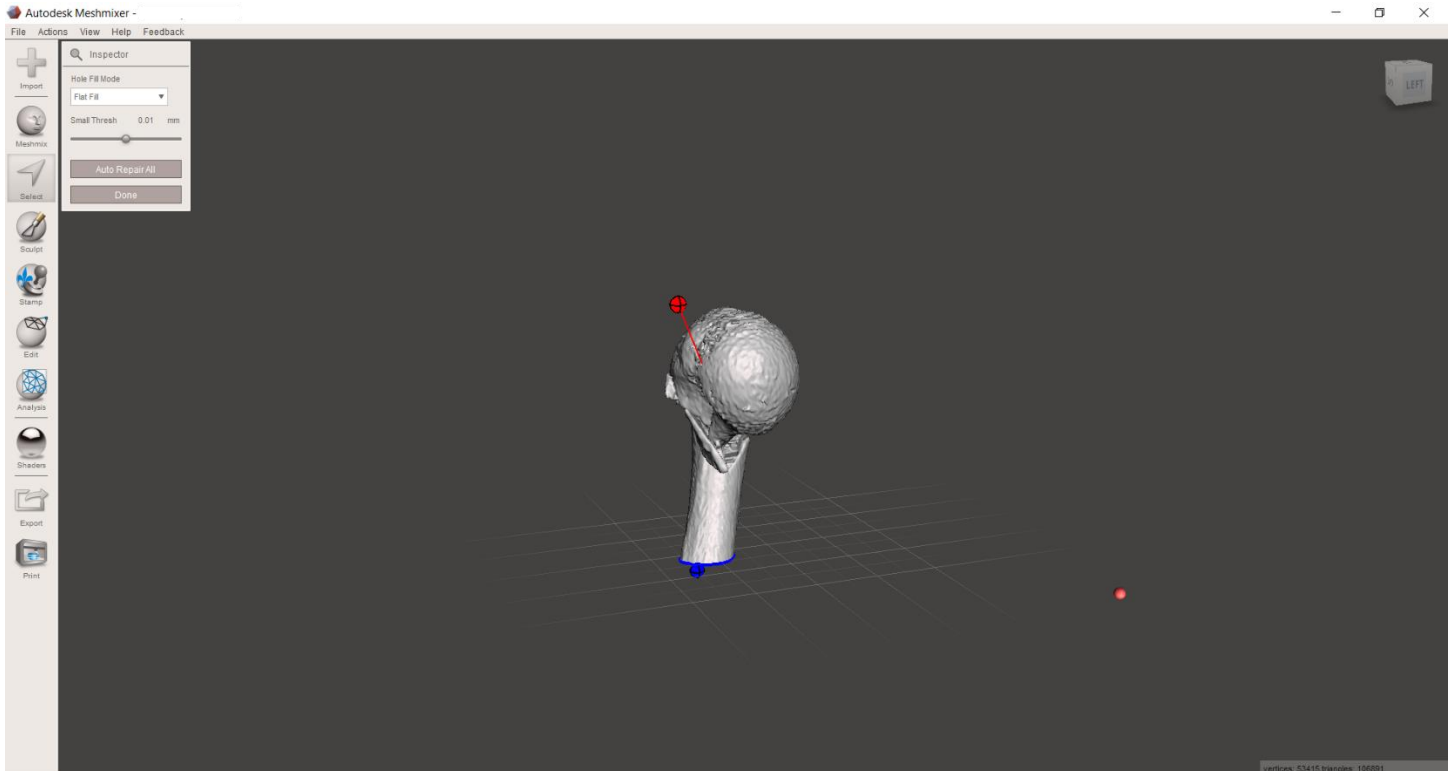
Meshmixer es un programa capaz de manejar elementos teselados, sobreentendiendo los modelos 3D como un conjunto de triángulos. Al transferir el modelo STL obtenido desde InVesalius nos encontramos con el húmero que deseamos terminar de retocar, en este caso rodeado de algunos elementos que no son de nuestro interés. El primer paso a realizar será seleccionar estos elementos extraños y eliminarlos, como se ve en la [Figura 29](#) y en la [Figura 30](#).



*Figura 29. Ajuste del modelo en Meshmixer, primer paso. Se realiza una selección de los elementos ajenos al modelo para eliminarlos. Para ello, una forma simple es hacer “triple clic con el botón principal del ratón” sobre el húmero y ejecutar el patrón “Invert” presionando la tecla “I”. Tras ello, se puede eliminar los elementos sobrantes dándole a suprimir, obteniendo como resultado el húmero en solitario, como se aprecia en la [Figura 30](#).*

Cabe recordar que la figura proviene de Invesalius como un elemento prácticamente macizo en su totalidad por el tratamiento que se le ha dado previamente. En caso contrario, podría ser conveniente someterlo a este tratamiento de forma automática mediante Meshmixer mediante la herramienta “Make solid” del menú de edición, aunque este paso puede estar sujeto a fallos.

Usualmente, la matriz tendrá pequeños defectos que Meshmixer es capaz de subsanar de manera inteligente por sí solo. Este paso fue aplicado en todos los húmeros, y fue llevado a cabo mediante el elemento “Inspector” del menú de Análisis. Se puede apreciar en la [Figura 30](#) cómo son detectados los fallos por esta herramienta.

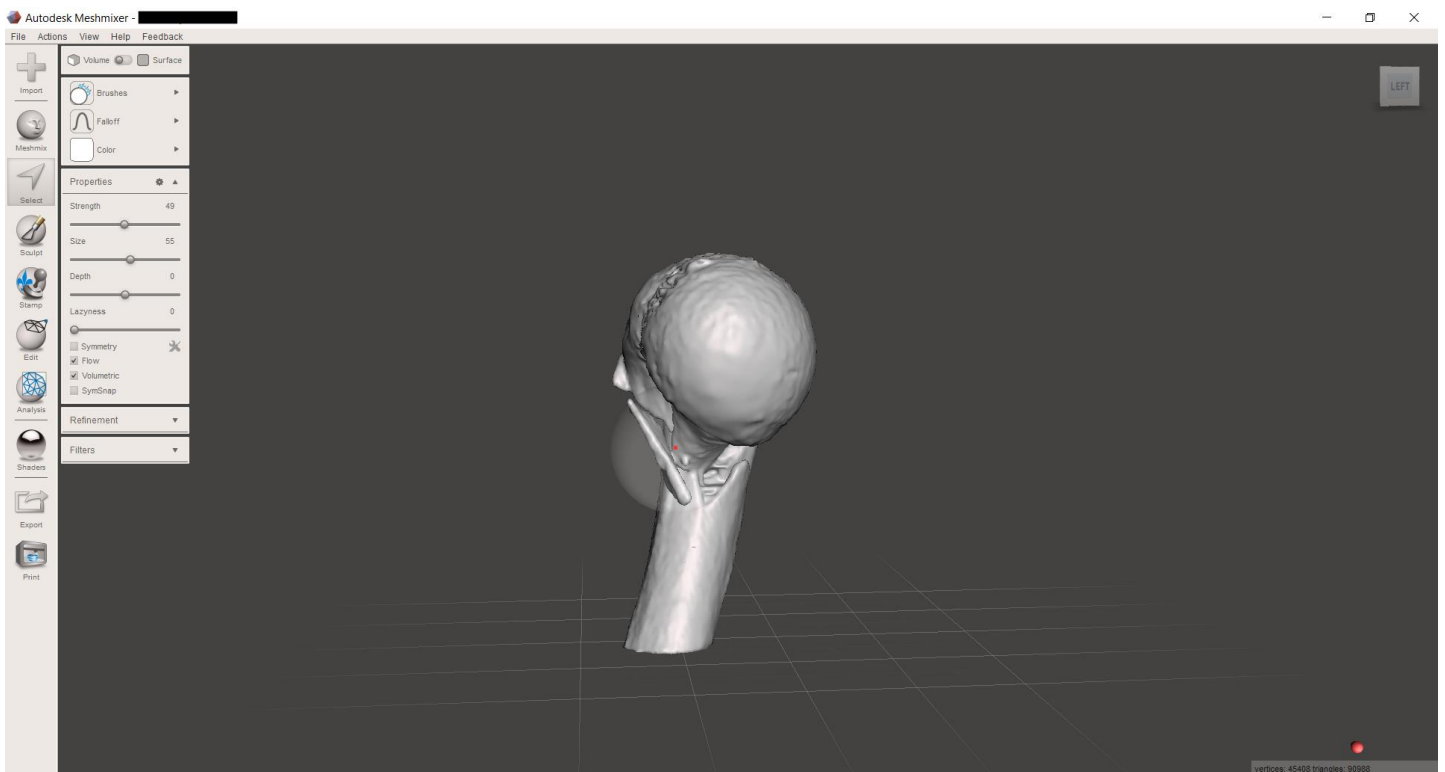


*Figura 30. Ajuste del modelo en Meshmixer, detección de errores de manera automática. En la imagen se puede apreciar que ya se han eliminado los elementos sobrantes no deseados para nuestro estudio, quedando el húmero aislado. Se puede apreciar como la herramienta “Inspector” detecta dos fallos en la matriz que autosubsana, sin encontrar nuevos errores tras esta primera corrección. Se establece que los fallos detectados sean autorrellenados en plano.*

A partir de este paso se realiza un retocado más artesanal de las figuras que dependerá del usuario que lo realice. En nuestro estudio, la premisa fue conseguir un modelo de húmero de una sola pieza en el cual se diferenciaran bien las zonas de vacío entre fragmentos y en una superficie que, aunque alisada, debía ser lo más fiel posible a rugosidad natural de un hueso humano. Por tanto, se realizó un post-procesado manual consistente en dos pasos:

Paso 1 – Alisado del modelo con pinceles: mediante pinceles de suavizado tipo “Flatten” o “Robust smooth”, siempre con pasadas rápidas para eliminar las espículas artificiales resultado del artefacto de la informatización el propio modelo. Se puede ver el modelo durante este proceso en la [Figura 31](#) y tras terminar el mismo en la [Figura 32](#).

Paso 2 – Demarcado de las líneas de fractura: en tanto que la idea del estudio era poder manipular todos los fragmentos como una sola entidad, se determinó que era necesario buscar una solución para mantener unidos todos los fragmentos mediante una matriz que resultara claramente artificial y que tuviera una significación para todos los encuestados equivalente a fractura. Para ello, se revisó el TAC y se seleccionó (con herramienta de selección o tecla “S”) todo trazo de fractura que presentara el modelo, eliminando la zona seleccionada (herramienta de borrado o letra “X”). De esta manera, quedaría un hueco delimitado por una línea azul. Al hacer doble clic sobre este borde azul se selecciona todo el defecto, el cual rellenamos mediante la herramienta para ello (Letra “F” del teclado), especificando que deseamos un relleno tipo “Flat Minimal”, el cual crea unos grandes triángulos artificiales. Una vez aceptado este cambio, y sin abandonar la selección de la zona, se realiza un retoque del grado de extrusión (tecla “D” del teclado), aplicando un ligero off-set negativo de alrededor de 1mm que acentúe lo artificial de la zona. El resultado final se puede apreciar en la [Figura 32](#). Para evitar problemas de interpretación, el aspecto de los trazos de fractura fue explicado específicamente al comité de expertos y a cada uno de los residentes entrevistados, como se detallará en el apartado [III.5.4 Charla de instrucción previa al cuestionario](#). No obstante, cabe mencionar que todos los encuestados manifestaron que los modelos eran claros en este respecto y no había dudas relacionadas con este aspecto de los mismos.



*Figura 31. Alisado del modelo con pinceles. Se realiza un alisado pasada a pasada tratando de eliminar defectos visualmente erróneos y comprobados con las imágenes originales del escáner, secundarios a artefactos propios del proceso. Es importante no excederse en el alisado para evitar modelos con aspecto artificial.*

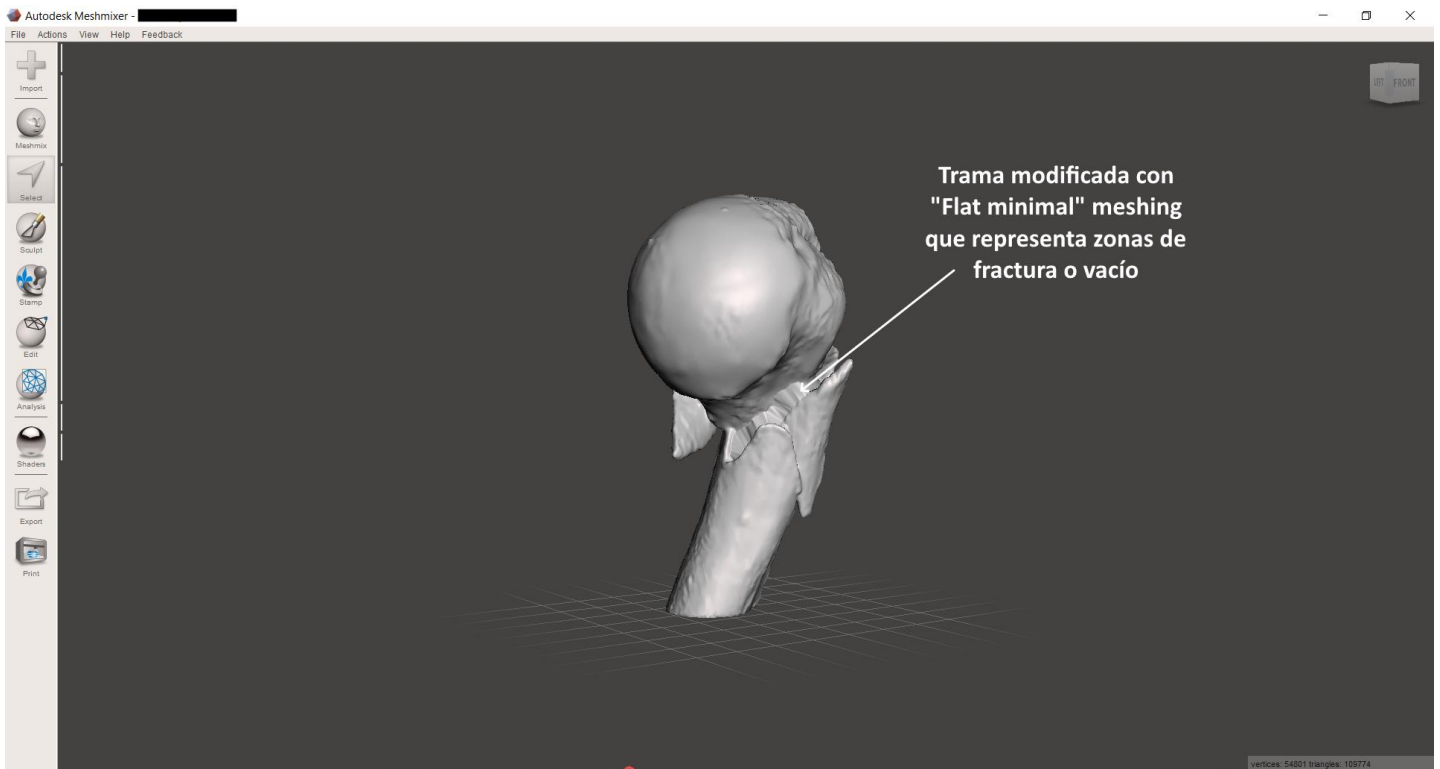


Figura 32. Demarcado de las líneas de fractura y resultado final. Procedimiento realizado como se explica en el paso 2 previamente relatado en el texto

Finalmente, se exporta el modelo en formato STL de nuevo. Este STL definitivo será el último nexo común en el diseño de ambos brazos del estudio. Las divisiones y tratamientos posteriores del mismo, por tanto, diferirán para obtener modelos de realidad virtual o modelos impresos 3D. Sendos procesos serán explicados más adelante en sus respectivos apartados [III.6 Diseño del experimento en Realidad Virtual](#) o [III.7 Diseño del experimento impreso en 3D](#).

El ejemplo descrito sirve como modelo generalizado del tratamiento dado a cada uno de los húmeros incluidos en el trabajo. No obstante, es necesario saber que cada modelo presentaba ciertas particularidades y características propias, de modo que algunos requirieron de pasos adicionales.

Cabe mencionar el patrón “Make Solid” de nuevo. En general, para imprimir estos modelos no es necesario aplicar este patrón, dado que el post-procesado al que se someterá el modelo en Ultimaker Cura será suficiente para obtener un modelo eficiente impreso, como se explicará más adelante.

Sin embargo, a la hora de exportar los modelos a Unity, el reconocimiento de algunos de los modelos fue mejor tras someterlos a este paso, de modo que en alguno de los modelos se realizó y en otros se omitió.

Así se obtuvieron los 34 modelos humerales, enumerados del 1 al 34 al azar.

### III.4.3 Formularios de satisfacción, utilidad y confianza

Para ambos grupos se desarrollaron unas escalas de satisfacción-utilidad y unas preguntas de confianza, de cara a evaluar mediante escalas tipo Likert y una “Escala Visual Analógica” (EVA) respectivamente qué aportaba a los participantes en sendos campos el uso de estas nuevas tecnologías en la clasificación de húmero proximal.

La Escala Visual Analógica es un método psicométrico validado por múltiples autores que consiste en dar un valor de grado de conformidad numérico dentro de un número de valores finito, por ejemplo, “establecer el grado en que se está de acuerdo con una afirmación equis del 1 al 10”, “establecer cómo de dolorosa es una patología del 1 al 5” ... Esta escala, como su propio nombre indica, suele estar acompañada de elementos visuales.

Por otro lado, la escala tipo Likert, que recibe su nombre de su inventor, es otro tipo de escala psicométrica con ciertas similitudes con la EVA, típicamente utilizada en ciencias sociales y que se caracteriza por ser de carácter más cualitativo que la anterior, y usualmente con respuestas simétricas. Puede acompañarse o no de elementos gráficos. El ejemplo típico de Escala Likert: “en qué grado estás de acuerdo con esta afirmación”, con respuestas posibles “totalmente en desacuerdo”, “en desacuerdo”, “neutro”, “de acuerdo” y “totalmente de acuerdo”.

Ambas escalas son utilizadas en muchos estudios sociales y sanitarios y han demostrado ser útiles desde el punto de vista psicométrico y sociológico, estando plenamente validadas en sus formas convencionales, con funcionalidades similares según qué estudio [Guyatt et al., 1987; Voutilainen et al., 2016; Kuhlmann et al., 2017; Sung y Wu, 2018]

Estos cuestionarios fueron pasados a los participantes inmediatamente después de terminar el cuestionario, en unas condiciones sin coacción y explicando que es necesario que sean sinceros de cara a evaluar de forma realista las posibilidades de las tecnologías utilizadas y poder compararlas en el ámbito de la docencia. Las respuestas fueron anónimas, al igual que en el resto del cuestionario.

En el trabajo original no se publicaron los resultados al respecto de estos parámetros, aunque actualmente el mismo equipo ha desarrollado el estudio estadístico de los mismos y se presentarán de manera escueta en el apartado [IV.4 Otros parámetros estudiados: aciertos en el tratamiento, satisfacción y utilidad](#).

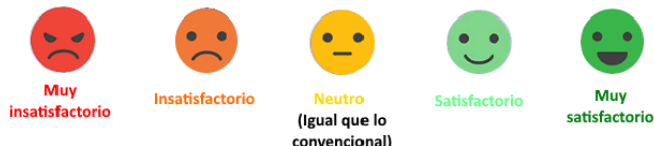
En total se efectuaron un total de tres preguntas de satisfacción-utilidad y dos preguntas sobre confianza de respuesta. Se pueden apreciar las cuartillas entregadas a cada uno de los participantes con las preguntas en cuestión en la [Figura 33](#) y en la [Figura 34](#). Los participantes debían completar estos cuestionarios marcando la opción que más se ajustara a su perspectiva con un círculo. Esta parte del cuestionario no fue cronometrada, al considerarse como un apartado distinto dentro del experimento.

Considerando “neutro” a los métodos convencionales de los que se dispone en su centro (TAC, radiografía, Reconstrucción convencional 3D...), responda comparativamente qué le parece el método diagnóstico al que se le ha expuesto en este estudio en los siguientes aspectos:

**¿Cuán satisfactorio le parece este método de cara a la docencia sobre fracturas de húmero proximal?**



**¿Cuán satisfactorio le parecería implantar este método en la planificación terapéutica de fracturas de húmero proximal?**



**¿Cuán útil le parece esta tecnología para mejorar su capacidad diagnóstica respecto a los métodos convencionales?**

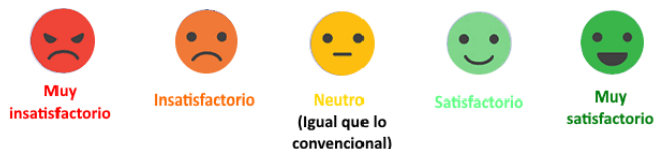
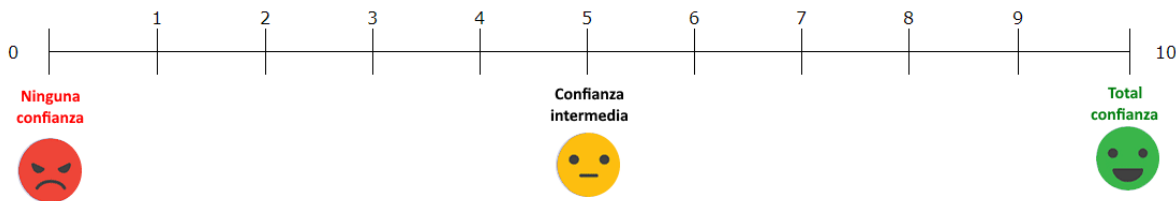


Figura 33. Cuestionario sobre satisfacción y utilidad tipo Likert

A continuación, queremos evaluar el grado de confianza con que usted diagnostica y clasifica las fracturas de húmero proximal

1. En su día a día, y usando métodos convencionales en su ejercicio hospitalario, con qué grado de confianza suele ser usted capaz de clasificar una fractura de húmero proximal (0 = ninguna confianza, es decir, no creo que haya acertado con el diagnóstico en absoluto ; 10 = confianza absoluta, es decir, estoy seguro de haberla clasificado correctamente)?



2. Respecto al estudio hoy planteado, y usando el método que se le ha ofrecido para el diagnóstico y clasificación de fracturas de húmero proximal: con qué grado de confianza ha sido capaz de clasificar estas fracturas de húmero proximal? (0 = ninguna confianza, es decir, no creo que haya acertado con el diagnóstico en absoluto ; 10 = confianza absoluta, es decir, estoy seguro de haberla clasificado correctamente)?

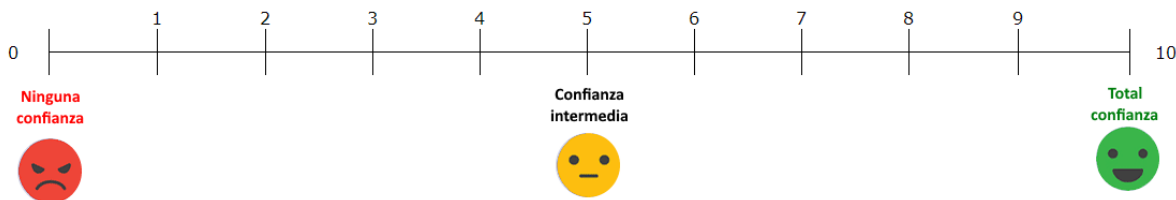


Figura 34. Cuestionario sobre grado de confianza. Escala Visual Analógica.

### III.5. Fase de pre-asignación

#### III.5.1 Diseño del estudio; ¿cómo se pasan los cuestionarios?

Es un estudio realizado se basó en la estructura teórica de un ensayo clínico aleatorizado tanto en el formato como en la asignación de grupo, así como en el carácter prospectivo del mismo, con la salvedad de que más que una medida terapéutica, los entrevistados eran expuestos a una tecnología de clasificación Gold Standard (Modelos impresos en 3D) o a su alternativa (Realidad Virtual), siempre con un 50% de probabilidad de pertenecer a cada grupo.

Cada uno de los residentes fue sometido al cuestionario de manera individual en unas condiciones comunes: una habitación aislada sin otros participantes y sin acceso a información que pudiera suponer cualquier tipo de trampa o sesgo en el estudio. El tiempo que se necesitó para poder reunirse en estas condiciones con cada uno de los 36 residentes que conformaron el estudio fue de aproximadamente dos meses, estimándose un tiempo medio invertido por el entrevistador en cada uno de los residentes de aproximadamente tres horas, teniendo en cuenta los siguientes tiempos: preparación del material, concertar la cita, transporte hasta el lugar de entrevista (a veces entre ciudades, normalmente medio hospitalario), explicación del cuestionario, realización del cuestionario, comprobación de la correcta recogida y ordenación de los datos en la tabla de Excel correspondiente, además de los intentos de cuestionario abortados (se requirió de aproximadamente 1,5 intentos para conseguir quedar para cada cuestionario).

Lo primero que se hace tras encontrarse en las condiciones descritas es entregar el consentimiento informado reflejado en el [VIII.2. Consentimiento informado a los entrevistados](#), tras lo cual se realiza la aleatorización del participante en cuestión mediante el método de la bolsa, explicado en el apartado [III.2 Obtención de participantes encuestados](#) y en la [Figura 21](#).

A todos los residentes se les dio una charla explicativa docente inicial sobre las mecánicas del experimento y otros factores a conocer para desempeñarlo. Esta charla completa viene transcrita en el apartado [III.5.4 Charla previa al cuestionario](#) y consta de partes generales para ambos grupos y partes específicas para cada uno de los brazos del estudio.

Todos los residentes realizaron el cuestionario de manera anónima, tras lo cual los datos extraídos, ya fueran en formato informático o en formato papel, recibían una codificación propia para cada residente. Este código se entrega a cada residente por si desea conocer a posteriori sus resultados en el cuestionario voluntariamente. Sólo un residente los ha solicitado hasta el día de hoy.

A todos los residentes, sea cual fuere el grupo de asignación, se les entregó tres cuartillas comunes en formato papel: las dos cuartillas presentadas en la [Figura 33](#) y [Figura 34](#) sobre satisfacción-utilidad y confianza y otra cuartilla con “datos de filiación”. Esta cuartilla de datos de filiación se rellenará antes de iniciar el cuestionario con los siguientes datos del residente encuestado: edad, sexo, grupo al que ha sido asignado, año de residencia, hospital de

residencia y experiencia previa con la tecnología que le ha tocado aleatoriamente. En esta misma cuartilla quedará un apartado de “tiempo” que quedará sin rellenar hasta el final del cuestionario.

Tras ello, se inició la prueba con la tecnología que haya tocado a cada residente por asignación aleatoria y, simultáneamente, se activa un cronómetro. Una vez el residente termina de responder todo el cuestionario, se notifica al entrevistador, que inmediatamente para el cronómetro. El entrevistador anuncia el tiempo en minutos y segundos y el residente lo transcribe a la cuartilla previamente mencionada. Por último, el residente rellena las escalas mostradas en la [Figura 33](#) y [Figura 34](#).

Volviendo a los datos de filiación y a la cuartilla inicial, la cual puede apreciarse en la [Figura 35](#), cabe arrojar algunos matices:

- Edad: reflejada en años. En general, la mayoría de residentes cumplieron la premisa de mayor edad – mayor año de residencia, aunque esto no fue así en todos los casos entrevistados.
- Sexo: un total de 25 hombres y 11 mujeres.
- Hospital en que está realizando su formación MIR: las opciones elegidas fueron a posteriori transcritas a la equivalencia WHO-CHOICE de hospitales de primer, segundo y tercer nivel, explicada en el apartado [1.1.2 Formación especializada en España. Niveles hospitalarios](#).
- Año de residencia: del 1 al 5 en función del año contractual que se esté cursando actualmente, sin tener en cuenta prolongaciones de residencia por cualquier causa. No obstante, en esta población no hubo residentes sometidos a prolongación por ninguna causa (bajas maternales, excedencias, sanciones...).
- Brazo del estudio: dependiendo de la asignación aleatoria
- Experiencia previa en el uso de tecnologías: este es un factor determinante, ya que se entiende que en el uso de tecnologías que no se utilizan de manera rutinaria existe una curva de aprendizaje que se debe someter a corrección de alguna manera o, al menos, tenerse en cuenta. En tanto que es difícil para los participantes recordar el número exacto de veces que han usado estas técnicas a lo largo de su vida, lo cual podría incurrir en un sesgo cognitivo de memoria, se decide establecer tres valores que hacen que la pregunta sea más fácilmente contestada por los participantes, que serían equivalentes a ninguna experiencia, poca experiencia (menos de 10 usos) o mucha experiencia (más de 10 usos en la vida).
- Tiempo invertido en el cuestionario: el tiempo que se tarda en responder el cuestionario al completo en formato MM:SS (M=minuto, S=segundo). Es el único parámetro rellenado tras el cuestionario.
- Nº de Referencia: un número con una parte aleatoria y una parte de codificación en base al hospital de referencia y el año de residencia, asignado por el investigador y compartido exclusivamente con el entrevistado para garantizar el anonimato a posteriori.

## ESTUDIO CLÍNICO:

### Nuevas tecnologías 3D en la interpretación de fracturas de húmero proximal durante la formación sanitaria en Cirugía Ortopédica y Traumatología: Estudio de concordancia interobservador.

Edad: \_\_\_\_\_ años

Nº de Referencia: \_\_\_\_\_

Sexo: \_\_\_\_\_

Hospital en que está realizando su formación MIR: \_\_\_\_\_

Año de residencia que está cursando actualmente: \_\_\_\_\_

Brazo del estudio que se le ha asignado aleatoriamente (señale con una X):

- Figuras impresas en 3D
- Realidad virtual

Experiencia previa en el uso de la tecnología que se le ha asignado por aleatorización (señale con una X):

- Ninguna (Nunca he usado Gafas de Realidad Virtual/Modelos impresos en 3D para nada)
- Poca (He usado Gafas de Realidad Virtual / Modelos impresos en 3D de 0 a 10 veces en mi vida)
- Mucha (He usado Gafas de Realidad Virtual / Modelos impresos en 3D más de 10 veces en mi vida)

Tiempo invertido en el cuestionario: \_\_\_\_\_ minutos y \_\_\_\_\_ segundos

*Figura 35. Cuartilla de datos de filiación. Esta fue entregada a todos los participantes de ambos brazos del estudio en formato papel.*

Ciñéndose de una forma general al experimento en sí, independientemente del brazo de asignación: utilizando la tecnología que le correspondiese, cada uno de los residentes visionó las 34 fracturas en un orden aleatorio (se explicarán las aleatorizaciones de los húmeros en el apartado [III.5.3 Aleatorización del orden de presentación de los casos](#)) de la manera correspondiente al grupo de asignación y aportó sobre cada una de ellas:

- Clasificación de Neer: eligiendo entre fracturas en 2, 3 o 4 fragmentos.
- Clasificación HGSL de Hertel: eligiendo entre las doce posibles opciones.
- Tratamiento a realizar: a elegir entre conservador, osteosíntesis y artroplastia.

Una vez obtenidos todos los datos mencionados en este apartado, estos fueron volcados a una tabla de Excel con la codificación correspondiente necesaria para realizar el posterior análisis estadístico de los elementos.

### **III.5.2 Aleatorización de los participantes por grupos**

Todos los participantes del estudio fueron aleatorizados de manera pura para conseguir un estudio semejante a un ensayo clínico aleatorizado. Se insiste en este hecho para recalcar que existe un azar puro y que, por tanto, la inferencia estadística tendría una mayor validez al no verse manipulada.

La mecánica de aleatorización fue mediante una bolsa opaca y extracción de papeles por reposición, como se describió detalladamente en el apartado [III.2. Obtención de participantes encuestados](#). De este modo, se garantizó la aleatoriedad y, de algún modo, la homogeneidad de los grupos inducida por estadística. De esta manera se evitan una serie de sesgos de selección.

Este sistema presentó riesgos inherentes de factor de confusión, principalmente por experiencia previa con la tecnología, hospital de procedencia (cuestionable, como se verá en resultados) o año de residencia, pero al realizar el análisis por subgrupos se apreció que existió una distribución homogénea entre ambos grupos del estudio por la propia aleatorización de los residentes. Lo se verá en el apartado [IV.1 Homogeneidad de los grupos](#). Por tanto, no fue necesario aplicar ningún control a posteriori sobre estos potenciales factores de confusión.

El orden en que se realizó la entrevista a los distintos residentes no fue estandarizado, es decir, no se siguió un patrón lógico en función del hospital en el que se encontraran o el año de residencia, por ejemplo, si no que se fue realizando como una serie sucesiva de entrevistas en función de la disponibilidad de los residentes y la posibilidad del entrevistador de acudir a su encuentro. Se entiende que este sistema se asemeja a una ordenación (que no muestreo) de conveniencia o accidental, y que de ningún modo puede haber perjudicado metodológicamente al estudio.

Se insiste en que no existe muestreo como tal porque se escoge como población a un grupo de residentes al completo de tres hospitales de distinto nivel, lo cual se puede considerar representativo de la población total de residentes y, a su vez, es la población completa deseada al principio (la población total de los residentes de esos hospitales excepto uno por causas técnicas del estudio).

Dicho todo ello, consideramos que el diseño de nuestro estudio garantiza, por una parte, la validez interna del estudio por haberse tenido en cuenta los múltiples sesgos que podía presentar el trabajo y haberse evitado, a la vez que la validez externa, en tanto que consideramos que la heterogeneidad de la muestra de residentes en cuanto a los parámetros de edad, sexo, año de residencia, nivel del hospital de procedencia y experiencia previa con las tecnologías estudiadas garantizan la representatividad en la población total de residentes (además de ser representativo inevitablemente de los datos de estos tres hospitales por abarcar prácticamente al total de la población diana del estudio – 36 de 37 residentes).

### III.5.3 Aleatorización del orden de presentación de los casos

Los autores consideramos que hacer aparecer a los húmeros siempre en el mismo orden del 1 al 34 podría acarrear ciertos sesgos, por ejemplo, por cansancio en los últimos modelos, por la influencia que pudieran ejercer unos modelos sobre los siguientes...Para evitar estos posibles sesgos por el orden de aparición de los húmeros, se realizó una aleatorización para cada residente.

Para que la premisa fuera válida, además, se explicó a cada residente en la charla previa al cuestionario que una de las normas del experimento es que no se puede volver atrás una vez se ha pasado al siguiente húmero.

Los húmeros ya habían sido aleatorizados en orden per sé en una primera instancia. La aleatorización que ahora nos ocupa, individual por cada residente, se realizó de dos maneras distintas, por razones meramente técnicas, dependiendo del grupo:

- Grupo de realidad virtual: el experimento al completo fue llevado a cabo en el software diseñado para ello, inclusive la aparición de húmeros y el rellenado del cuestionario (salvo las fichas de la [Figura 33](#), [Figura 34](#) y [Figura 35](#)), como se explicará en el apartado [III.6 Diseño del experimento en Realidad Virtual](#). Para conseguir que los húmeros fueran apareciendo de manera aleatoria, se generó una lista o “array” de los 34 posibles elementos y se sometió al algoritmo de barajado de Fisher-Yates diseñado dentro del programa por los investigadores. Este algoritmo se implantó en el software de manera que cada uno de los elementos sólo podía aparecer una vez en la secuencia, acabándose la secuencia cuando todos los húmeros hubieran aparecido una sola vez, ni más ni menos. En tanto que la aleatoriedad de este algoritmo no depende del barajado en sí, sino más bien de la aleatoriedad/pseudoaleatoriedad de la ordenación de la lista tras pasar de un elemento a otro, es necesario realizar una comprobación de que las mecánicas son realmente aleatorias. Por ello, los investigadores realizaron un total de 100 experimentos antes de iniciar el estudio en sí, comprobándose que no existían errores y que los elementos del conjunto se distribuían de una forma más o menos homogénea entre todas y cada una de las posibles posiciones de aparición [Eberl, 2016; Jin et al., 2020].
- Grupo de impresión 3D: en este grupo, el experimento al completo fue llevado a cabo con las réplicas de los húmeros en escala 1:1 impresas y las respuestas fueron dadas todas en papel (inclusive las fichas de la [Figura 33](#), [Figura 34](#) y [Figura 35](#)) redondeando la opción deseada en cuartillas de papel con las opciones impresas, una por modelo humeral, como se explicará en el apartado [III.7 Diseño del experimento impreso en 3D](#). Como se ha explicado, cada residente de este grupo recibió 34 cuartillas enumeradas del 1 al 34 con un orden aleatorio. Esta aleatorización se realizó mediante la plataforma <https://www.random.org/lists/>, introduciendo los números del 1 al 34 y ordenando manualmente las cuartillas en función del orden que arrojará el algoritmo. Este proceso se realizó 30 veces, previendo que estadísticamente era poco probable que hubiera más de 30 participantes que por asignación aleatoria cayeran en el grupo de figuras impresas en 3D.

Estos cuadernillos se enumeraron del 1 al 30 y se fueron usando secuencialmente. Finalmente, se utilizaron los cuadernillos del 1 al 18 (tantos como residentes pertenecieron a este grupo). De nuevo, al igual que con cualquier software, sería necesario demostrar que la capacidad de aleatorización es correcta. En este caso, el algoritmo de la página web utilizada ya había sido avalado por agencias reguladoras independientes como la eCOGRA, TST-Global y Gaming Labs International, las cuales habían certificado mediante múltiples experimentos que su algoritmo de ordenación, desde el punto de vista estadístico, es capaz de generar una aleatoriedad correctamente.

#### III.5.4 Charla de instrucción previa al cuestionario

Antes de iniciar el experimento como tal, y justo después de la aleatorización, se leyó una charla completa y por puntos tanto a los expertos durante la primera fase como a cada uno de los residentes durante la fase experimental. La charla dada a cada residente, a modo de breve seminario de unos 15-20 minutos, fue la siguiente (enmarcada en color amarillo):

Tal y como describe el **consentimiento** que acaba de firmar, este experimento es anónimo. Usted nos cede el permiso de uso de las respuestas que nos suministre de manera anónima, y puede retirar este consentimiento cuando desee hasta iniciarse los trámites de publicación de los datos, que siempre serán anonimizados. Usted tiene derecho a conocer su evaluación si lo desea y así lo solicita, a través del código de referencia con que se guardan sus datos. Nos confirma que no padece ningún tipo de trastorno neurológico que pueda implicar un problema a la hora de usar las gafas de realidad virtual.

Así mismo, son también anónimos los **datos sensibles** correspondientes a los pacientes que cedieron sus imágenes médicas para el desarrollo de este experimento. Esto tendrá ciertas implicaciones que a posteriori se comentará, antes de empezar el experimento.

Los modelos que va a analizar a continuación pertenecen a todos los pacientes que presentaban una serie de criterios de inclusión que sufrieron una fractura de húmero proximal en los últimos 10 años y fueron atendidos y tratados en el Área Sanitaria Norte de Málaga.

En total, los 34 húmeros que verá suponen más de la mitad de las fracturas de húmero proximal a las que se le solicitó un TAC en este periodo y hospital. Es importante este contexto, porque supone que en dicha Área Sanitaria se piden un promedio de unos 6,3 TAC por fractura de hombro al año, es decir, se piden pocos respecto a lo esperable. En palabras de los traumatólogos de este servicio “**sólo pedimos TAC a fracturas que nos generan muchas dudas sobre qué tratamiento aplicar**”. Consideramos justo e importante realizar esta contextualización para evitar sesgos y entender que la mayoría de las fracturas pueden ser graves, aunque otras no lo serán.

Deberán **clasificar cada uno de los 34 modelos** presentados a continuación a través de las clasificaciones de Neer (elegirán entre 2, 3 o 4 fragmentos), HGLS (elegirán una de las 12

opciones concretas) y el tratamiento que le aplicarían a dicha fractura. Dispondrán de **todo el tiempo que precisen y serán cronometrados**

Respecto a las **clasificaciones diagnósticas**, tendrán que clasificar todas y cada una de las fracturas por dos sistemas *\*Se muestran imágenes de las clasificaciones que verán plasmadas durante el experimento en una lámina impresa igual a las del brazo de figuras en 3D, que se verá en el apartado [III.7 Diseño del experimento impreso en 3D](#)\**, tendrán estas imágenes de referencia durante todo el experimento. Hay 2 clasificaciones:

☐ **Sistema de Neer:** clasifica del 2 al 4 en función del número de fragmentos. Se han excluido los subtipos de luxación por no existir una glena de referencia y estar en entredicho en algunas modificaciones actuales de la clasificación. Deberá seleccionar entre las 3 opciones mencionadas.

☐ **Sistema HGLS de Hertel:** menos preconizado en la docencia de nuestro medio, divide al húmero proximal en Head-Greater tuberosity-Lesser tuberosity-Shaft, de ahí su acrónimo. Se nombra con las letras juntas entre sí si los fragmentos permanecen juntos y con guiones entre ellas si están separados. Así, por ejemplo, una fractura en que la cabeza anatómica y el troquíter se han separado totalmente, pero la diáfisis y el troquín siguen juntos, se llamaría H-G-LS. *\*Se comprueba que entienden la mecánica\**.

**Respecto al tratamiento**, cabe puntualizar dos hechos *\* Se muestran imágenes de los tratamientos que verán plasmadas durante el experimento en una lámina impresa igual a las del brazo de figuras en 3D, que se verá en el apartado [III.7 Diseño del experimento impreso en 3D](#)\**:

☐ **Opciones:** las 3 opciones son una imagen de un cabestrillo (que hace referencia al tratamiento conservador en cualquiera de sus variantes), una placa de osteosíntesis (que hace referencia a cualquier opción de osteosíntesis que usted considere oportuna) y una prótesis inversa de hombro (que hace referencia a cualquier opción de artroplastia que usted considere posible).

☐ **Validez:** insistiendo en que no se puede revelar datos sensibles, deberá dispensar el tratamiento sólo en base al patrón de fractura. Se entiende de antemano que esta respuesta tendrá, por ello, poca trascendencia clínica per sé y que las conclusiones extraídas del apartado de tratamiento estarían sometidas a un fuerte sesgo. Por ello, le notificamos que nuestra idea inicial es no incluir estos datos en ningún estudio, aunque quisiéramos recogerlos por curiosidad científica para sopesar si puede extraerse algún tipo de relación directa simplemente entre el trazo de fractura y la decisión, de cara a futuras hipótesis científicas.

Rogamos que, en la medida de lo posible, **no revele información** sobre el experimento a otros compañeros residentes que aún no hayan sido encuestados y que pueda alterar el resultado del experimento.

Una vez termine el experimento, deberá rellenar un breve **questionario de satisfacción, utilidad y confianza**. Será totalmente anónimo. Rogamos que sea absolutamente sincero con su percepción de este experimento, ya que ello determinará si es conveniente seguir utilizando esta línea de investigación con fines sanitarios y/o educativos.

Finalmente, se procede a explicar las **mecánicas** del experimento que debe usted conocer para su correcta resolución *\*dependiendo del grupo al que haya sido asignado el residente se le contará uno de los siguientes dos párrafos\**:

**Grupo de impresión 3D:** *\*se entenderá mejor en conjunto con el apartado [III.7 Diseño del experimento impreso en 3D](#)\** Aquí delante tiene usted dos láminas a color, plastificadas, en formato A4 que muestran las clasificaciones de Neer y Hertel, además de las posibles opciones de tratamiento. Ambas son exactamente iguales, con la salvedad de que a su izquierda queda dispuesta la que tiene imágenes de húmeros derechos y a su derecha la que tiene imágenes de húmeros izquierdos (como si mirara al paciente de frente), con la intención de evitar sesgos según la lateralidad de los modelos que se les presente. Aquí tiene un cuaderno con un total de 34 hojas, enumeradas del 1 al 34 en orden aleatorio, que son exactamente iguales que las láminas en A4, pero con peor calidad de imagen, en A5 y en blanco y negro (también respetan la lateralidad). Además, tiene unas planchas de goma espuma delante con 34 húmeros incrustados en ellas, enumerados igualmente del 1 al 34 e identificados como “D” = Derechos o “I” = Izquierdos. Deberá ir rellenando cada lámina con una clasificación de Neer, una de Hertel y un tratamiento, tal y como se le ha explicado previamente, apropiados para el modelo de húmero impreso en 3D referenciado con el mismo número que refleje la lámina, y así sucesivamente con las 34 láminas que le aparecerán. Por ejemplo, si su primera lámina es la número “X” *\*la que le haya tocado\**, deberá coger el húmero nº “X”, comprobar su lateralidad (escrita en la plancha de goma espuma y visible en la propia lámina – en este caso izquierda/derecha *\*señalando\**), y marcar en la lámina correspondiente qué clasificación de Neer, Hertel y tratamiento le asignaría, redondeándolas en la lámina, tras lo cual dejará el modelo en el sitio de donde lo cogió y pasará a la siguiente lámina y así sucesivamente hasta terminar con todas. No podrá volver a una lámina anterior una vez resuelta *\*Se coge el húmero que le haya tocado primero\**. Como puede ver, todos los húmeros tienen en su base escrito, de nuevo, su número y la lateralidad. Además, en todos apreciará una trama artificial de triángulos grandes y con un escalón respecto al resto de modelos que hace referencia al vacío del trazo de fractura, ya que había que crear algún tipo de nexo de unión entre los fragmentos para sostenerlos *\*se muestra\**.

**Grupo de Realidad Virtual:** *\*se entenderá mejor en conjunto con el apartado [III.6 Diseño del experimento en Realidad Virtual](#)\** Usted va a visionar en un entorno de realidad virtual las mismas imágenes que se le han mostrado en las láminas a color, y estarán permanentemente disponibles en el *entorno* *\*Se lanza la apk y se sincronizan las gafas, puestas en el entrevistador, con un ordenador portátil que se tendrá delante a través del enlace <https://www.oculus.com/casting/>\** Como ve en la pantalla del ordenador, este es el entorno, y a su izquierda quedan dispuestas la clasificaciones de Neer y HGSL de Hertel que tienen imágenes

de húmeros derechos y a su derecha las que tienen imágenes de húmeros izquierdos (como si mirara al paciente de frente). Del mismo modo, a su izquierda van a ir apareciendo los húmeros derechos y a su derecha los húmeros izquierdos automáticamente. *\*A partir de este punto el entrevistador va explicando las mecánicas a la vez que las reproduce para que el residente las vea en la pantalla del portátil\** En este entorno usted se puede mover andando por la habitación en la que nos encontramos si se encuentra de pie, o bien puede elegir permanecer sentado y desplazarse con el joystick del controlador izquierdo paso a paso. El joystick del controlador derecho permite teletransportarse a un punto que usted marque, aunque no recomendamos usar esta opción de movilidad. Podrá agarrar los húmeros extendiendo su mano hasta ellos y presionando el gatillo interno de cualquiera de los dos controladores (recomendamos el derecho). Una vez agarrados, podrá desplazarlos en el espacio y girarlos como desee según mueva su mano. Si los suelta, se quedarán estáticos en el espacio en la posición que los soltó, flotando. Puede agarrarlos y soltarlos tantas veces como necesite. Puede ver que del mando izquierdo sale un láser, que he activado y dejaré activado durante todo su experimento por comodidad. Con ese láser debe apuntar a la opción de Neer que desee marcar y presionar el gatillo superior del mando izquierdo para marcarla. Sabrá que se ha marcado porque se iluminará en rojo momentáneamente. Debe hacer lo mismo para HGLS y el tratamiento. No importa si se equivoca ni cuántas veces lo haga, ni el orden en que responda a las cuestiones el programa sólo registrará la última opción marcada antes de pasar al siguiente húmero para cada una de las tres cuestiones que se le preguntan. Da igual si marca la opción en las clasificaciones para el lado izquierdo o derecho, el programa sobreentiende que es por comodidad. Una vez termine de responder a las 3 cuestiones, deberá darle una sola vez al botón “siguiente” que hay bajo los tratamientos, desapareciendo el húmero previo y apareciendo uno nuevo a su izquierda (húmeros derechos) o a su derecha (izquierdos). Es IMPRESCINDIBLE que cuando presione “siguiente” no esté usted sujetando el húmero previo, ya que si lo hace puede generar errores en el programa. Si al darle al botón siguiente no hay intercambio del húmero presente por otro nuevo, querrá decir que ha completado los 34 items del cuestionario. En ese momento, deberá girarse 180º y marcar con el láser el símbolo “√” que hay justo detrás suya, que debe iluminarse, guardándose sus respuestas automáticamente. *\*En este momento se reinicia el programa y se colocan las gafas de realidad virtual al residente\** Ahora es el momento de que usted pruebe todas las mecánicas descritas y, una vez esté preparado y cómodo, se reiniciará el programa y dará comienzo al experimento. *\*Se comprueba que el residente maneja las mecánicas y se reinicia el programa de nuevo, iniciando el experimento\**.

Se pregunta: **¿ha entendido usted todas las mecánicas** del experimento o existe algún tipo de dudas? Durante el experimento no podrá hacer más preguntas. *\*Se responden las posibles dudas que pueda tener el residente encuestado y se da inicio al experimento, cronometrando el tiempo hasta su fin\**.

Tras comprobar que todas las dudas están resueltas **se inicia el experimento**.

Esta charla puede resultar algo árida si no se acompaña de instrucciones visuales. Por ello, se insiste en que se consulten, si fuera necesario, los apartados [III.6 Diseño del experimento en Realidad Virtual](#) y [III.7 Diseño del experimento impreso en 3D](#), en los cuales se hablará en profundidad sobre las mecánicas y se podrán ver imágenes asociadas al respecto.

## III.6. Diseño del experimento en Realidad Virtual

### III.6.1 Desarrollo del entorno gráfico en Unity y Blender

Para crear el entorno gráfico a aplicar en Unity, en primer lugar, se creó un plano base en Blender 2.93 (Países Bajos, 1994) por parte del equipo de ingenieros participantes en el estudio, para poder así trabajar sobre el mismo.

Los modelos STL definitivos obtenidos en el apartado [III.4.2 Diseño de húmeros en 3D: InVesalius y Meshmixer](#) fueron enviados a través de un enlace seguro y exentos de datos sensibles al equipo de ingenieros, los cuales realizaron un depurado en blender de los mismos para establecer similitudes de formato a la hora de exportarlos a Unity. Se puede ver el entorno de desarrollo en sus etapas más iniciales en la [Figura 36](#).

Una vez realizado el paso previo, se produjo la exportación a Unity 2020.3.26 LTS de Unity Technologies (Copenhague, 2004). En este contexto, se utilizó el XR Interaction Toolkit 1.0 como marco o “frame” de realidad virtual para manejar la interacción del hardware. Este “frame” está disponible en el repositorio de Unity y ofrece un conjunto de herramientas para administrar la entrada de hardware y traducirla en acciones de entorno virtual.

Se transmitió al equipo de ingenieros una serie de directrices a aplicar en el entorno, entre las cuales se mencionan:

- Deben aparecer las siguientes preguntas:
  - ¿Qué grado de fractura de Neer considera que presenta el paciente?
  - ¿Qué tipo de fractura de Hertel considera que presenta el paciente?
  - ¿Qué actitud terapéutica considera que sería la más apropiada para cada paciente? (A posteriori cambiaría por “tratamiento recomendado” por estética).
- Las preguntas deben aparecer justo encima de la clasificación que les corresponda o encima de los tratamientos, respectivamente.
- La distribución, mirando de frente, debe ser: Clasificación de Hertel para húmeros derechos – Clasificación de Neer para húmeros derechos – Tratamientos y botón de siguiente - Clasificación de Hertel para húmeros izquierdos – Clasificación de Neer para húmeros izquierdos.
- Las clasificaciones deben aparecer ordenadas de la misma manera que se han enviado.

- En Neer, la elección de cualquiera de las imágenes de una misma columna es indistinta (2, 3 o 4 fragmentos). En Hertel y en tratamiento, cada imagen tiene su propia respuesta (nombre de las imágenes enviadas)
- Cuando se marque una opción, esta debe verse visualmente marcada. Debe haber opción de corregir la selección en caso de fallo humano
- No puede haber opción de volver al número anterior. No se puede pasar al siguiente sin dar las 3 respuestas.
- Los números derechos tienen que aparecer justo delante de las clasificaciones de Hertel y de Neer para húmeros derechos (en medio de ambas) y húmeros izquierdos tienen que aparecer justo delante de las clasificaciones de Hertel y de Neer para húmeros derechos (en medio de ambas).
- El cuestionario debe estar centrado justo en frente de los tratamientos, de modo que los húmeros izquierdos aparezcan o “hagan spawn” a la derecha del usuario y, a su vez, los húmeros derechos aparezcan a la izquierda. La lateralidad de los húmeros es, según el número de referencia con el que se han enviado:
  - Húmeros derechos: 1, 2, 4, 6, 11, 12, 13, 18, 19, 22, 23, 27, 28, 30, 32, 34
  - Húmeros izquierdos: 3, 5, 7, 8, 9, 10, 14, 15, 16, 17, 20, 21, 24, 25, 26, 29, 31, 33
- El botón de siguiente debe estar accesible y bloquearse unos segundos cada vez que se pulse para evitar saltarse algún número
- El botón de fin del cuestionario debe estar relativamente escondido, pero accesible, para evitar que se marque durante el experimento involuntariamente.

Tras estas directrices iniciales, se fueron enviando distintas versiones cargadas del trabajo, las cuales se fueron testando en busca de fallos en la mecánica o en la programación. Este proceso llevó aproximadamente 3 semanas, con pruebas diarias de todo tipo, sometiendo al programa a cualquier situación posible.

Fue necesario realizar hasta un total de 6 versiones hasta corregir todos los fallos incompatibles con el desarrollo del experimento. Finalmente, el software fue llamado “Fractures Classification, v.0.6” (Francisco García Rivera y Maurice Lamb, Skövde, Suecia, 2022) y se mantiene como una “versión alfa” a día de hoy, que será publicada previsiblemente como un recurso de aprendizaje abierto en SideQuest en los próximos meses, una vez se perfilen ciertos aspectos del entorno gráfico y las funciones de guardado, que pueden resultar incómodas como se explicará más adelante, pero que no interfieren en el desarrollo de este experimento.

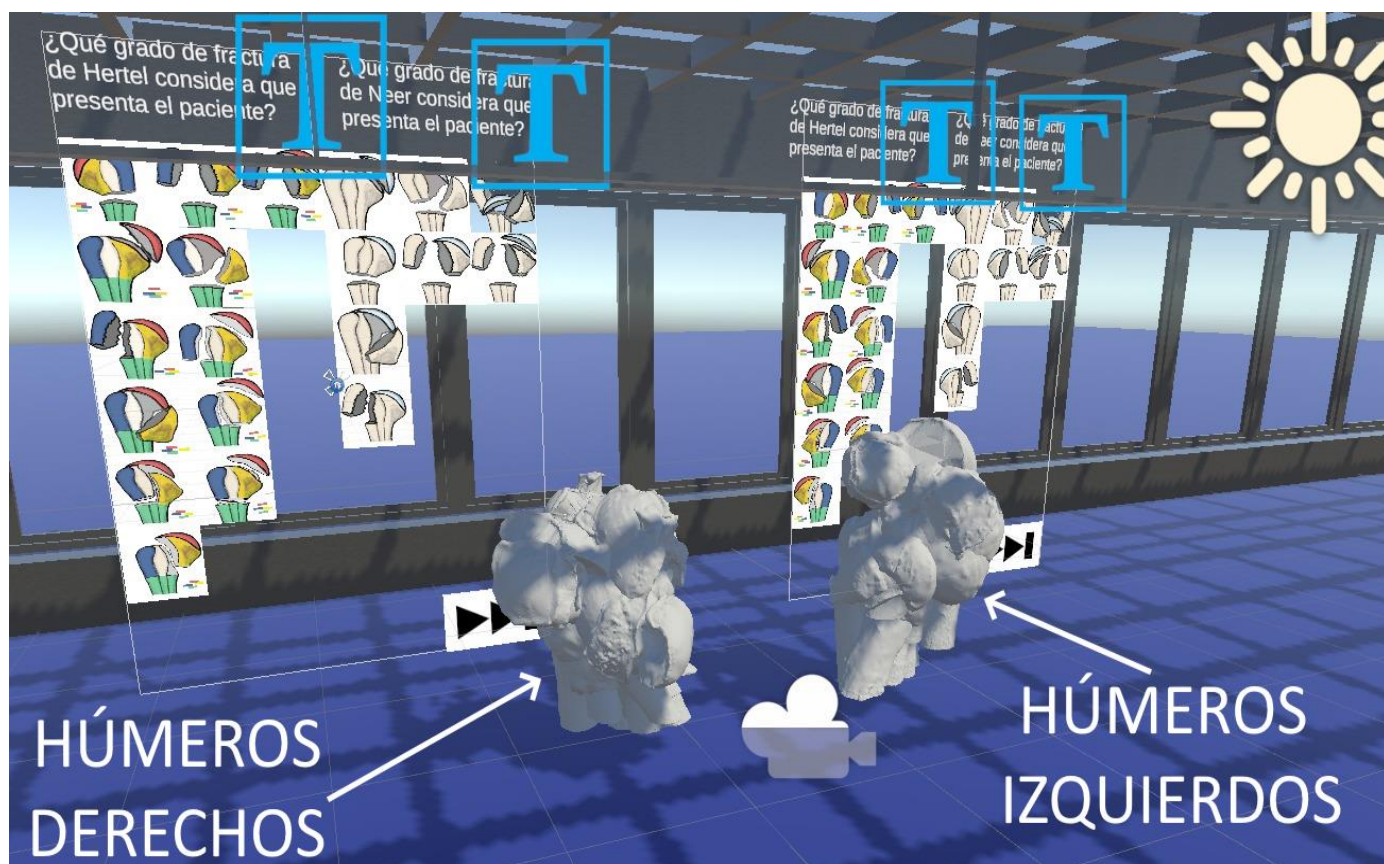


Figura 36. Entorno de desarrollo de la versión v0.1 de Fractures Classification. Se ve el entorno gráfico desarrollado en Blender y la inclusión de los húmeros. El jugador se coloca aproximadamente en la zona donde aparece el icono de cámara de vídeo. Así, a su izquierda quedan los húmeros derechos con sus respectivas clasificaciones, y a la izquierda los derechos. Estos húmeros están situados en el lugar donde aparecían todos y cada uno de ellos (de ahí el maremágnum de figuras), pero durante la ejecución del experimento iban apareciendo en solitario. Aparecen múltiples defectos que se fueron puliendo en las sucesivas versiones previas a la realización del experimento (por ejemplo, el subtipo HGL-S de Hertel estaba intercambiado entre izquierda y derecha, o faltaban las opciones de tratamiento).

Como se ha explicado, el entorno fue madurando visualmente hasta alcanzarse la fase final del v0.6, donde todos los errores que pudieran alterar la mecánica del estudio habían sido subsanados correctamente. Se puede ver en la [Figura 37](#) el entorno que finalmente fue utilizado en el experimento y visto por los participantes del estudio.

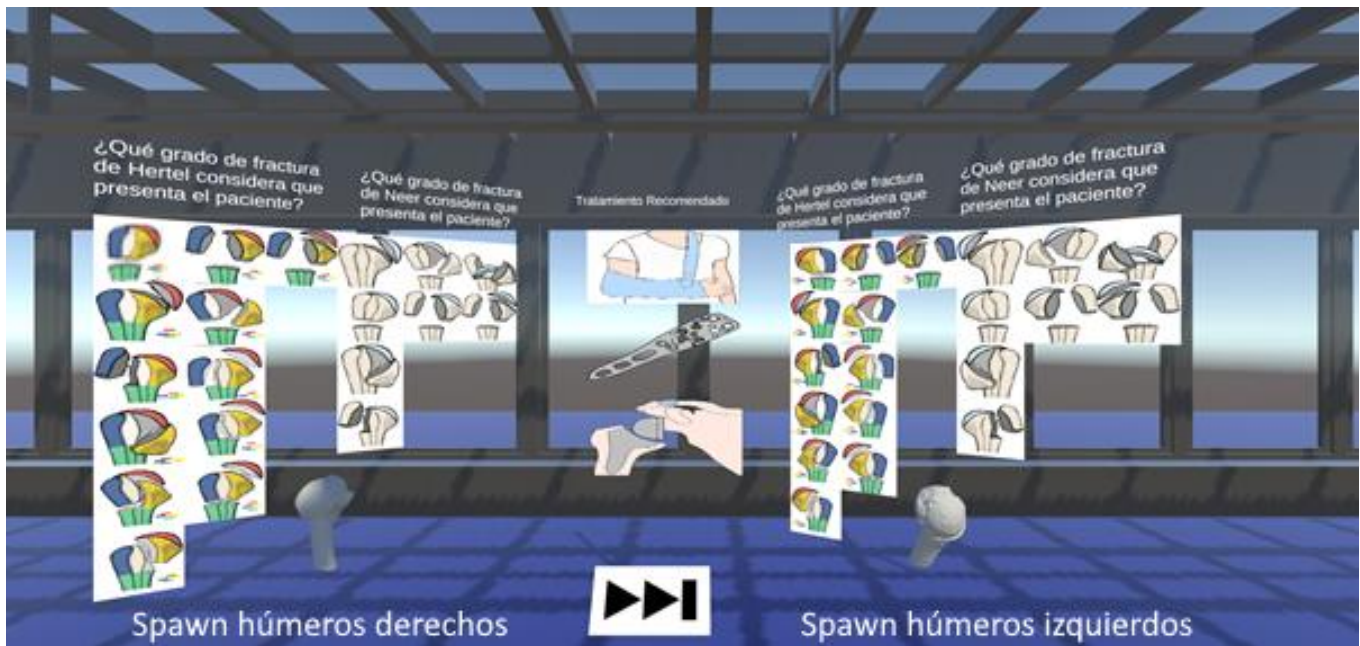


Figura 37. Entorno gráfico de la versión v0.6. Se puede apreciar lo que el jugador vea de frente al colocarse en el punto indicado. Se dejan dos húmeros, uno derecho y uno izquierdo, de referencia para ver los puntos de aparición o “spawn” según el lado humeral. Insistimos en que durante el experimento sólo debía aparecer un húmero a la vez.

### III.6.2 Hardware, software y mecánicas de evaluación

Respecto al hardware, el experimento se realizó con el sistema de realidad virtual Oculus Quest 2, que incluye una pantalla montada en el propio sistema de gafas VR autónoma con una resolución de 1832 por 1920 píxeles por ojo y una frecuencia de actualización o “refreshing” de 90 Hertz. El entorno de estas gafas all-in-one es gestionado mediante dos controladores desarrollados por el propio fabricante Oculus, permitiendo interacción con la realidad virtual a través de los mismos. Se puede ver el dispositivo utilizado para el experimento en la [Figura 38](#).

Para poder introducir el programa desarrollado por el equipo de investigación asociado a este proyecto, fue necesario activar el modo desarrollador de las gafas de realidad virtual. Este procedimiento es relativamente sencillo gracias al concepto de desarrollo libre incentivado por Oculus, a diferencia de otros dispositivos y marcas comerciales. Tal es el afán por ello de esta compañía que explica cómo activar este modo en su propia página web. Se puede ver a través del presente enlace: <https://developer.oculus.com/documentation/native/android/mobile-device-setup/>.

Una vez activado el modo desarrollador, se instaló el software Fractures Classification de AlmironRiveraSolutions, desarrollado por nuestro equipo de ingenieros. Dado que el software no llegó a estar subido a la nube como dominio público en ningún momento, este fue instalado a través de la aplicación de escritorio de SideQuest. Para acceder a él desde las gafas, fue necesario abrir la carpeta de “Orígenes Desconocidos”, donde Oculus guarda las apk. Se puede apreciar en la [Figura 39](#).



Figura 38. Set-up de Oculus Quest 2. Se puede ver las gafas oficiales de meta con sus 2 controladores. Se adquirió un soporte cefálico no oficial de Kiwi-design para una mayor comodidad de los residentes, como se puede apreciar en la imagen.

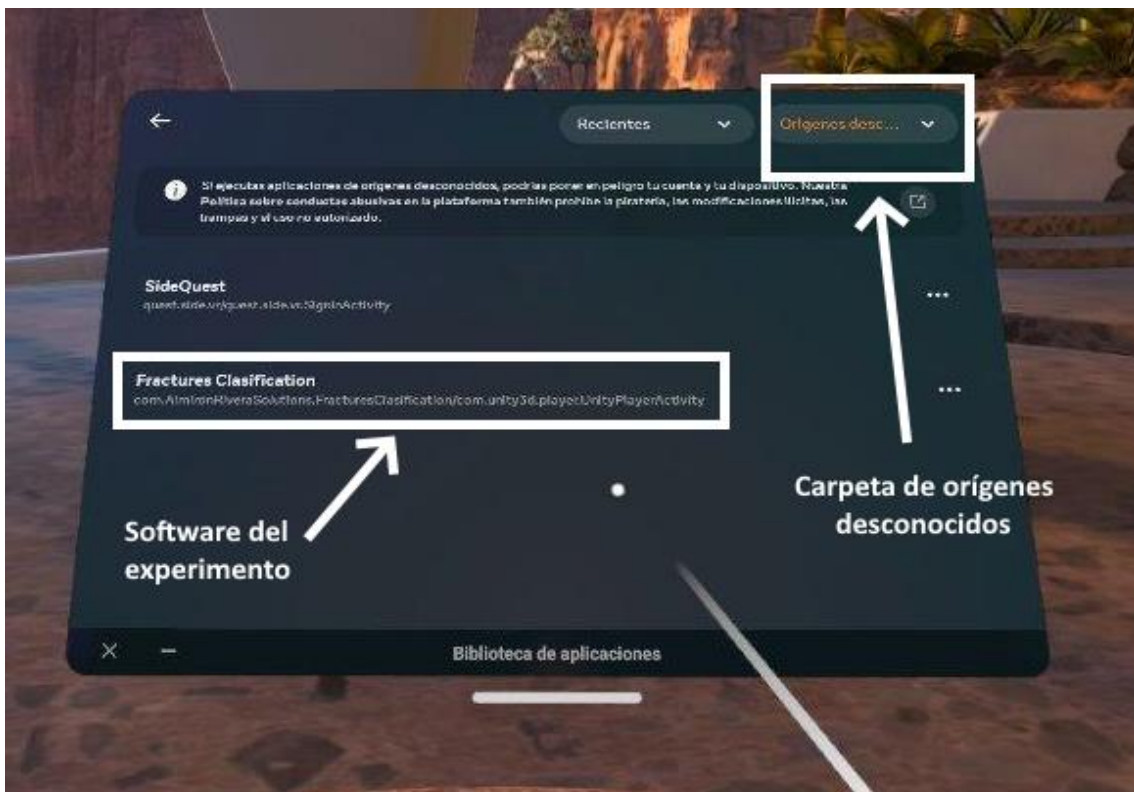
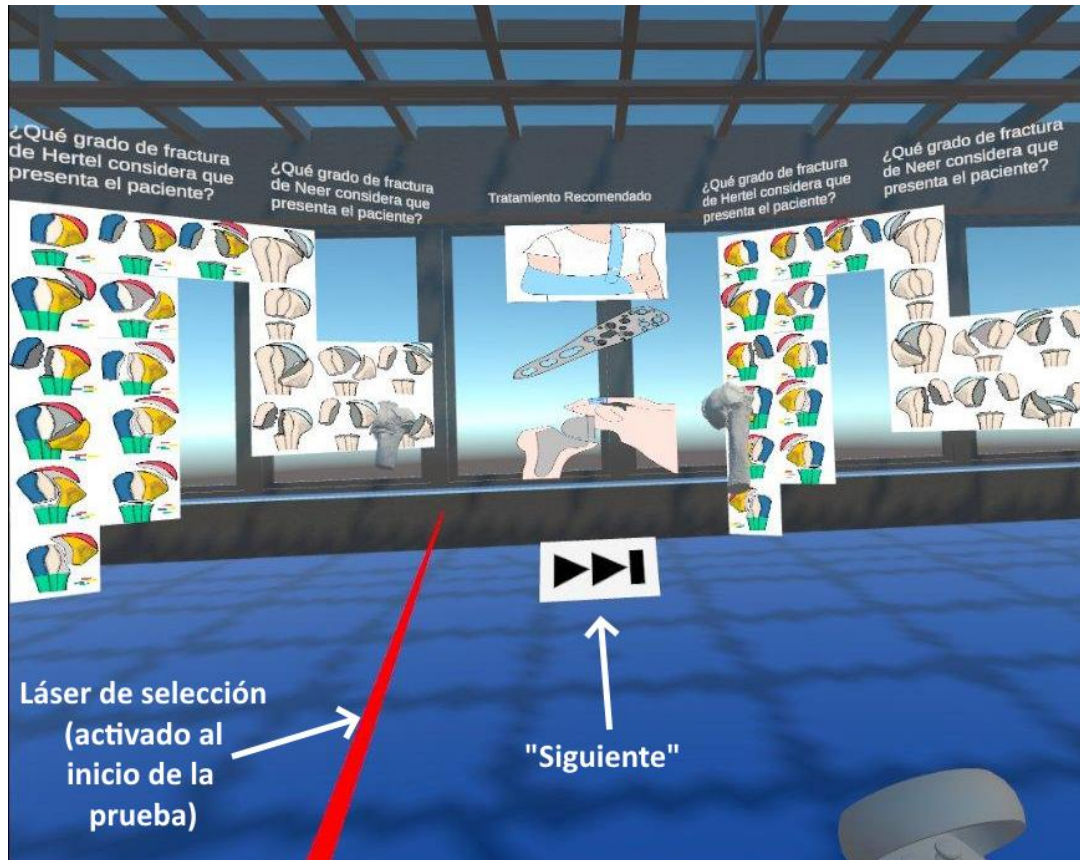


Figura 39. Interfaz de acceso al programa. La aplicación "Fractures Classification" v 0.6 (en versiones posteriores corregida la errata "Clasification" del nombre) de AlmironRiveraSolutions.

La interfaz gráfica final a la que se enfrentaron los residentes se puede apreciar frontalmente en la [Figura 40](#), en la cual se ha inducido la aparición de 2 húmeros a la vez para hacernos a la idea de dónde salen los húmeros derechos y dónde los izquierdos. Al aparecer, siempre lo hacían en una posición en la cual la corredera bicipital miraba hacia el punto donde se recomendaba al participante que se colocara, para tener mejor referencia anatómica.



*Figura 40. Entorno gráfico donde se desarrolla el experimento. Se pueden ver a la izquierda las clasificaciones de Neer y Hertel para húmeros derechos con un modelo de húmero derecho delante de ellas. Lo mismo para húmeros izquierdos en el lado derecho. En medio apreciamos las opciones de tratamiento y el botón “siguiente”. Se puede ver también el láser para seleccionar opciones.*

El experimento se podía realizar moviéndose por la habitación del mundo real y, por ende, en el virtual, o bien sentado, moviéndose sólo en el mundo virtual con los joysticks y ligeros movimientos corporales de tronco y miembros superiores acompañando para alcanzar los húmeros. Esta segunda opción fue la recomendada y la que usaron la mayoría de encuestados, para evitar sensación de mareo o problemas derivados de poca experiencia con esta tecnología.

En la [Figura 41](#) se puede ver cómo, durante el experimento, se podía cambiar y manipular la posición de los húmeros agarrándolos. Para agarrarlos, había que colocar el controlador pegado a ellos (da igual derecho o izquierdo) y presionar el gatillo interno o de dedo corazón de dicho controlador. Una vez terminada la manipulación, basta con soltar el gatillo para que el húmero quede flotando en la posición que lo dejamos, como se ve en la [Figura 42](#).

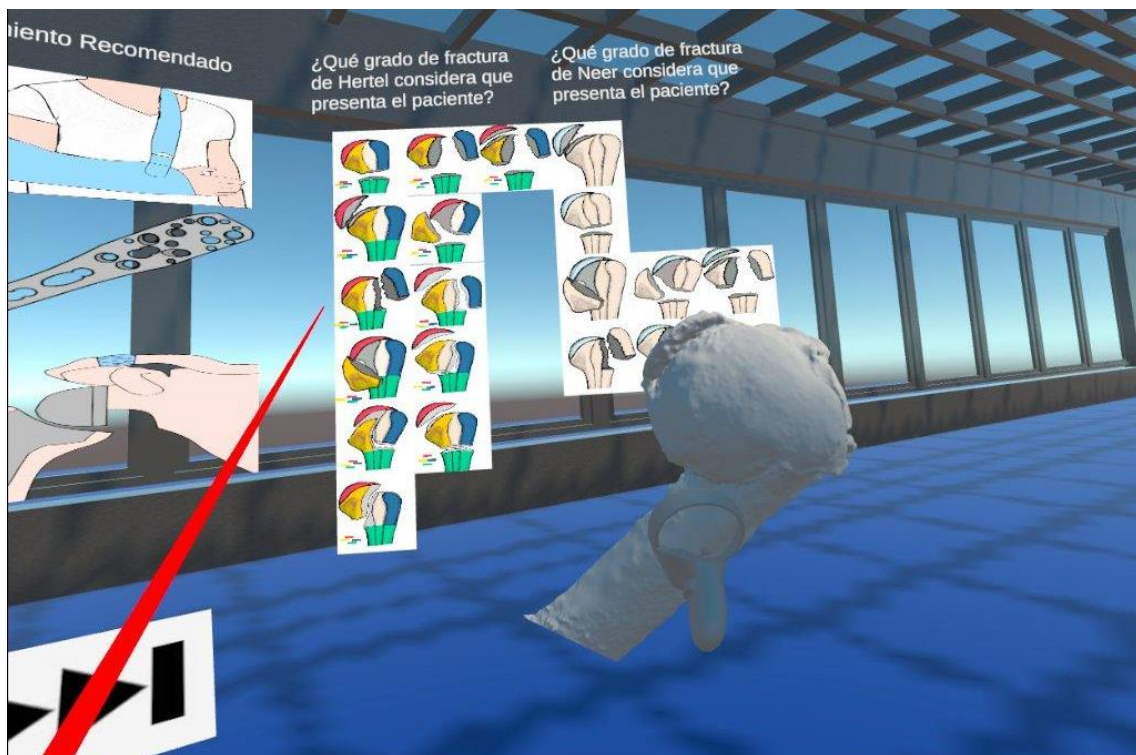


Figura 41. Manipulación espacial del húmero proximal (izquierdo en este caso). Se realizó “agarrándolo” con el controlador (derecho en este caso) mientras se presiona el gatillo interno con el tercer dedo.

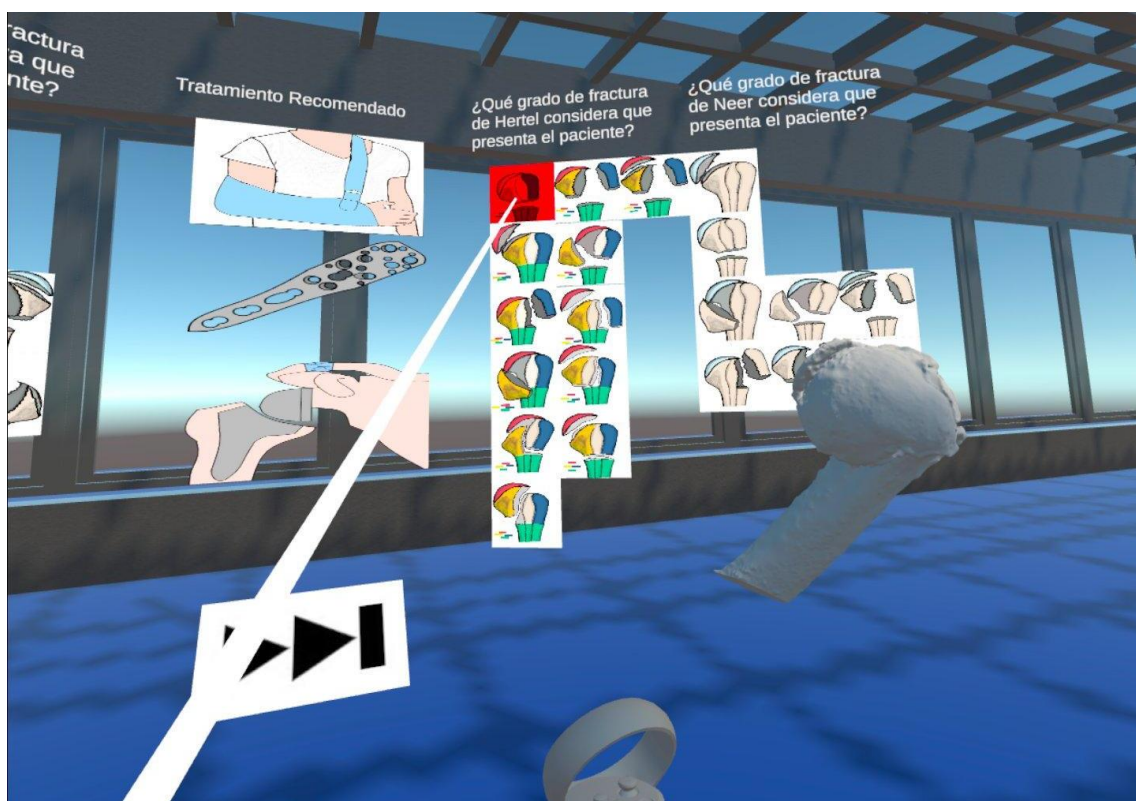


Figura 42. Selección de opciones. A través del láser del controlador izquierdo y presionando el gatillo superior del mismo con el segundo dedo. Se ve cómo se marca en rojo al seleccionar la opción.

En la [Figura 42](#) se ve cómo es el proceso de elección de opciones. Se realiza con el láser del mando izquierdo, apuntando y “disparando” con el gatillo superior o de dedo índice del controlador o mando izquierdo. Al hacerlo efectivo, la respuesta seleccionada se marca en rojo momentáneamente. Como se explica en el apartado [III.5.4 Charla de instrucción previa al cuestionario](#), no importa equivocarse al elegir, ya que la opción registrada por el programa es la última seleccionada de cada una de las tres (Neer, Hertel y tratamiento) antes de darle a “siguiente húmero”. En dicho apartado se explican también otra serie de mecánicas del programa que los residentes debían conocer.

Aunque ya se ha explicado también en el mencionado apartado, se recordará a través de la [Figura 43](#) los controles diseñados para la interfaz de juego. Cabe insistir en que el experimento se desarrolló de una manera en la que se buscó que los participantes, si no lo deseaban, no tuvieran que estar moviéndose por la sala. En el momento en que se colocaban en la posición recomendada, justamente entre ambos “spawn” o punto de salida de húmeros y frente a los tratamientos y “botón de siguiente”, los participantes normalmente eran capaces de agarrar todos los húmeros y manipularlos con tan solo pequeños balanceos de cuerpo y giros de cabeza acompañados de movimientos de los brazos o, a lo sumo, algún ligero toque al cursor de movilidad del mando izquierdo. La mayoría de participantes de este grupo realizaron el experimento sin levantarse de la silla en ningún momento.

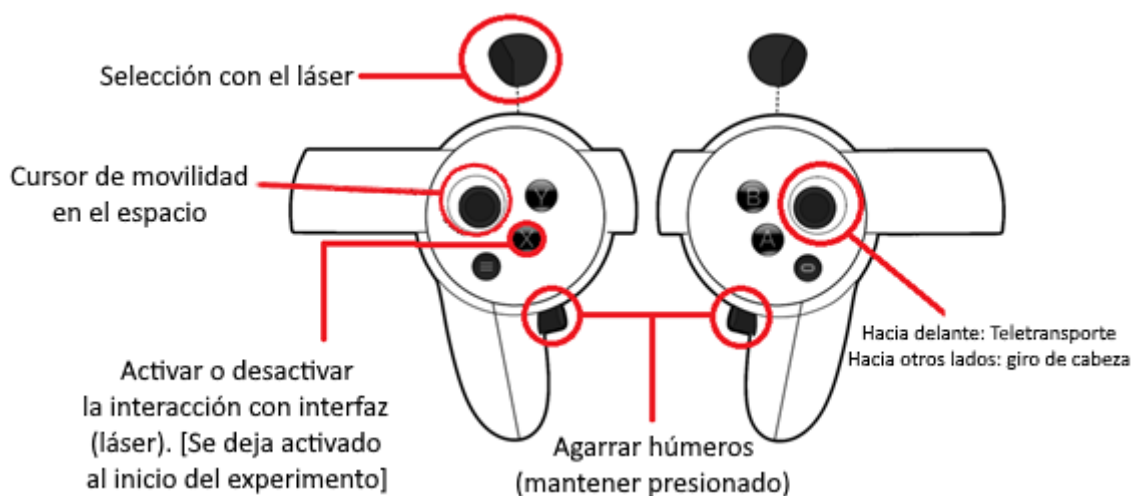


Figura 43. Representación gráfica de los controladores y sus controles configurados.

Tras terminar el cuestionario, el botón de “siguiente” deja de surtir efecto y los jugadores tienen que “Terminar cuestionario”, dándole al botón “✓” situado tras la posición recomendada para la realización del test y que se puede ver con perspectiva en la [Figura 44](#). Al hacer clic en este botón, automáticamente se genera un documento .CSV (.csv, CSV o .txt son otras nomenclaturas válidas) con todos los datos de los húmeros que han ido apareciendo.

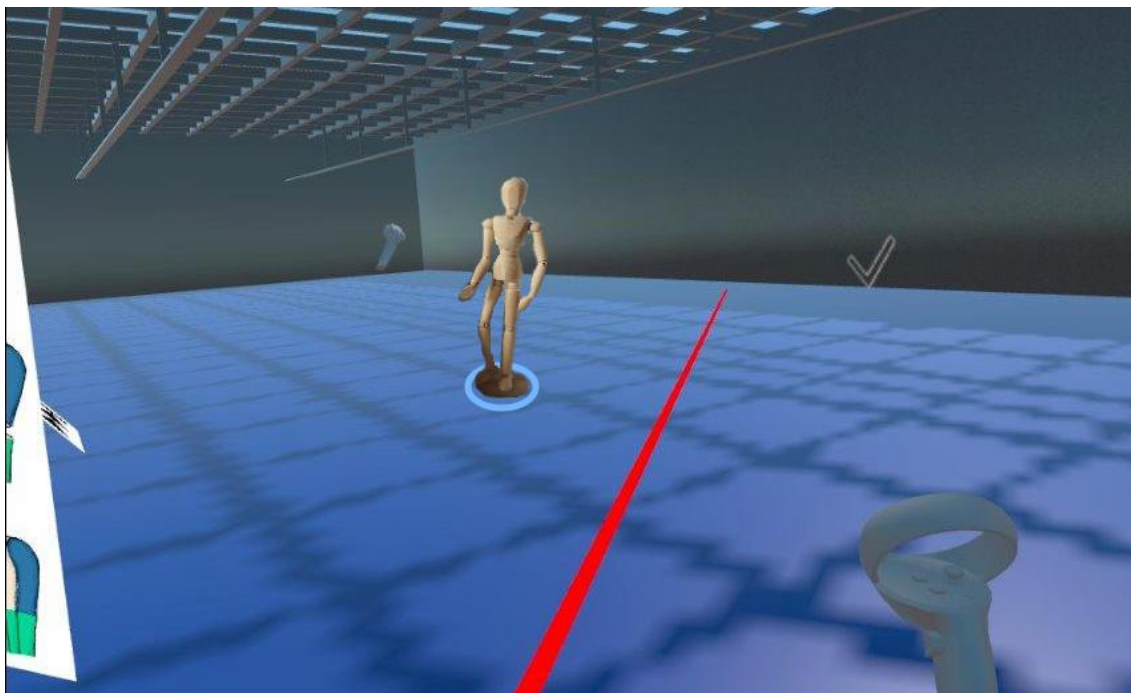


Figura 44. Botón de finalizado. Se puede apreciar el botón ✓, que da fin al cuestionario y al guardado de las opciones seleccionadas al activarlo con el láser. Imagen tomada desde justo al lado de la clasificación de Hertel de húmeros derechos para ver la sala desde otra perspectiva. El círculo azul y el “dummy” encima añadido a esta figura, simbolizan el lugar donde se recomienda que se coloque el participante de cara a realizar el experimento.

Este .CSV, a posteriori trabajado sobre Excel, se anidaba en el root de las gafas Android>almironriverasolutions>data, apareciendo tantos .CSV como intentos de cuestionario se realizaran. Dentro de cada .CSV encontrábamos rellenas 34 celdas en las primeras 34 filas de la primera columna, en el orden de aparición dentro del intento. Se emitió un .CSV por cada intento. Dentro de cada celda se encontraba una secuencia A, B, C, D separada por comas entre sí. “A” hacía alusión al número de referencia del húmero, “B” al grado de Neer que se le había dado (2, 3 o 4), “C” al grado de HGLS (HGL-S, HG-LS, HGL-S, H-G-LS etc...) y “D” al tratamiento recomendado por el residente (1 = conservador, 2 = osteosíntesis, 3 = quirúrgico). Durante las pruebas preliminares a pasar el cuestionario a los residentes, se advirtió un problema en la secuencia, probablemente secundaria al algoritmo de aleatorización aplicado. Se apreció que las respuestas dadas en el húmero visto en primer orden se reflejaban en el segundo, las del segundo en el tercero... dando un patrón donde siempre se daba A (x), B (x-1), C(x-1) y D(x-1), refiriéndose a número de orden (no a número referencia humeral). Curiosamente, las respuestas del último húmero visto se asignaban finalmente al primer húmero que se había mostrado. Este error se subsanó simplemente con la siguiente secuencia: Se realizó el patrón Datos → texto en columnas → Delimitados (siguiente) → [x] coma (siguiente) → Finalizar, teniendo así los datos separados en columnas. Se desplazó toda la columna A una celda hacia abajo, quedando A1 libre. Las celdas B2-B4 se cortaron y se pegaron a nivel de B35-D35. Después se eliminó la primera fila, quedando resuelto el problema.

Además, se apreció otro fallo de nomenclatura en el que los números, en lugar de numerarse del 1 al 34 como se había establecido con los expertos, estaban numerados del 0 al 33. No obstante, el orden no se alteró, de modo que la solución residió simplemente en sumar un +1 a los valores de "A". Posteriormente, se reordenarían las filas en base a los valores de la columna A, obteniendo la secuencia ordenada de los números del 1 al 34 con las respuestas dadas por los residentes para cada uno de los 3 ítems preguntados.

Ambos errores se descubrieron fruto de las experimentaciones previas, y se aplicó este parche para poder llevar a cabo el experimento sin problemas. En versiones posteriores al experimento, tras muchos ajustes que llegaron a desconfigurar aspectos esenciales del programa, se ha conseguido subsanar el error.

El programa actualmente continúa en desarrollo, de cara a ser publicado. Los objetivos que los desarrolladores se han marcado antes de saltar de la "versión alfa" a una "versión beta cerrada" pública para pocos usuarios son (la mayoría cumplidos a día de hoy):

- Crear una portada e interfaz tipo juego de inicio.
- Establecer un menú en el que se puedan elegir entre modelos de distintos huesos del cuerpo, tanto en su estado fisiológico como en sus distintas formas de fractura.
- Establecer un modo "test" en el que el participante tenga que clasificar un número de fracturas de una o varias partes del cuerpo según el participante decida. Por ejemplo: "Quiero hacer un test de clasificar 20 fracturas de distintos huesos del miembro superior".
- Solucionar los problemas de traducción a .csv, para conseguir una traducción automática sin necesidad de que el usuario tenga que aplicar una secuencia tan farragosa sobre un Excel para conocer sus resultados. Además, querríamos proyectar al final de cada intento en el propio software el número de aciertos y fallos para que el jugador pueda evaluar sus resultados.
- Añadir un registro con los resultados de cada jugador para ver sus estadísticas, progresión y/o mejora adquirida a través del uso.
- Establecer un sistema de logros y méritos desbloqueables con las sucesivas partidas y mejoras, estimulando el aprendizaje por incentivos positivos.
- Mejorar el diseño gráfico del entorno virtual donde se realiza el experimento.
- Error en el nombre: cambiarlo a "fractures classification", corrigiendo la errata.
- Establecer un marcador en el punto recomendado del mapa para realizar el experimento.

El plan de protección de patente del software se encuentra actualmente en trámite. Existen conversaciones avanzadas para la inclusión del mismo en una "colmena" de desarrollo del Gobierno Sueco en colaboración con la Universidad de Skövde.

### III.6.3 El entorno del experimento virtual

El experimento fue llevado a cabo en una sala del hospital, intentando minimizar las distracciones y crear un entorno de entrevista idóneo.

El entorno virtual puede apreciarse en la [Figura 40](#), [Figura 41](#), [Figura 42](#) y [Figura 44](#), y está constituido por un plano creado en Blender 2.93 (Países Bajos, 1994) con imágenes interactivas tipo UI (User Interface) que representan las distintas opciones elegibles, además de objetos desplazables en el entorno (húmeros proximales, en formato STL inicialmente). Todo ello se integra a través de la interfaz de Unity 2020.3.26 LTS de Unity Technologies (Copenhague, 2004), como se explica en apartados previos.

La interfaz base fue compartida con otro proyecto de trabajo de nuestro equipo de ingenieros, sobre el estudio de la ergonomía de cadenas de montaje de una fábrica, de ahí el aspecto industrial del entorno. La compañía implicada compartió la interfaz de forma altruista.

### III.6.4 Mecánica de evaluación en la realidad virtual

Aunque en apartados previos se ha explicado todo de forma amplia, en resumidas cuentas, podríamos afirmar que la mecánica de evaluación de la realidad virtual fue:

1. Pasos comunes: aleatorización, consentimientos, rellenado de datos de filiación y charla explicativa (ver [III.5.4 Charla de instrucción previa al cuestionario](#)).
2. Explicación de las mecánicas de movimiento con las gafas puestas en el entrevistador y reproduciendo en directo sobre la pantalla de un portátil.
3. Prueba de mecánicas siendo el residente el que lleva las gafas puestas.
4. Reinicio del programa e inicio de la prueba (cronometrada).
5. Resolución de los 34 casos, dando respuesta en cada uno a Neer, HGLS y tratamiento oportuno.
6. Fin de la prueba: el botón “siguiente” deja de ser efectivo. El residente gira 180º y hace clic en el botón de terminar intento “✓”. Se corta el cronómetro.
7. Rellenado del cuestionario de satisfacción-utilidad y confianza.
8. Revisión inmediata del estado correcto del archivo CSV, sin revisar resultados para no vulnerar anonimato. Se pone al CSV como nombre el código alfanumérico único de cada residente.
9. Una vez recogidos todos los datos del estudio de todos los participantes: ajuste uno a uno del defecto del Excel explicado en apartados previos, y paso y ordenamiento de datos en un Excel común codificado para su posterior paso a Stata-Corp.

## III.7. Diseño del experimento impreso en 3D

### III.7.1 Post-procesado pre-impresión: Ultimaker Cura

Cada uno de los modelos obtenidos en STL mediante el procedimiento explicado en el apartado [III.4.2 Diseño de húmeros en 3D: InVesalius y Meshmixer](#) fue sometido a un post-procesado en el software Ultimaker Cura 4.5 (Ultimaker, 2020).

Este software se encarga de procesar cualquier imagen en 3D y traducirla en un código que le dice a la impresora cómo tiene que mover su extrusor y/o camilla y a qué velocidad emitir filamento, según el modelo de impresora que se esté utilizando. Este programa presenta indexados perfiles de las impresoras más comunes del mercado. En nuestro caso, la impresora utilizada fue una Creality Ender 3 v2, de modo que se buscó el perfil de funcionamiento más parecido existente dentro del programa, que fue el Creality Ender 3.

Una vez elegido el modelo de impresora, se eligió como filamento de impresión un PLA con una punta de extrusión de 0.4mm (se explicará en [III.7.2 Impresión de los modelos en 3D](#)). Bajo estas circunstancias, Ultimaker Cura emitió como resultado una serie de patrones de impresión que debía seguir la impresora. Tras múltiples pruebas e intentos, se determinó que era necesario hacer pequeños ajustes en estos patrones para obtener una mejor calidad y rendimiento en la impresión, disminuyendo el gasto superfluo de material y el tiempo de impresión a la vez que la tasa de fallos.

En la [Figura 45](#) se reflejan los ajustes iniciales de impresora propuestos por Ultimaker Cura y los que finalmente fueron usados para el experimento tras realizar distintas pruebas, remarcando los parámetros que se ajustaron. Los cambios más destacables realizados fueron:

- Inclusión de soportes: piezas de armazón creadas desde la base de impresión hasta la pieza en el eje Z, que luego son retiradas de la pieza final. De esta manera, se evita que queden zonas del eje Z inferiormente a la pieza sin imprimir y, por tanto, existe un mayor soporte de la pieza y un menor riesgo de que la impresión fracase, a expensas de un sobregasto de material y tiempo. Ultimaker preestablece que, una vez se introducen soportes, estos deben aparecer bajo piezas que tengan inclinaciones de 45°. Nosotros fuimos más permisivos y asumimos el ligero riesgo de ajustar a 50°. Se puede ver qué aspecto tienen los soportes durante la impresión en la [Figura 52](#).
- Densidad de relleno: la pieza no es maciza ni hueca, sino que se rellena con una trama, que se puede ajustar. En nuestro caso nos decantamos por el uso de una trama de relleno triangular que ocupara el 18% del volumen posible de la pieza (frente al relleno cúbico de 20% predefinido)

El menú mostrado en dicha figura refleja sólo los parámetros básicos, habiendo un menú mucho más amplio de opciones en el modo experto. Se hicieron algunas pruebas en este submenú, como el uso de soportes arborescentes. Finalmente, se decidió no realizar ajustes avanzados por no tener los investigadores suficiente experiencia al respecto y estar obteniendo resultados poco satisfactorios durante las pruebas

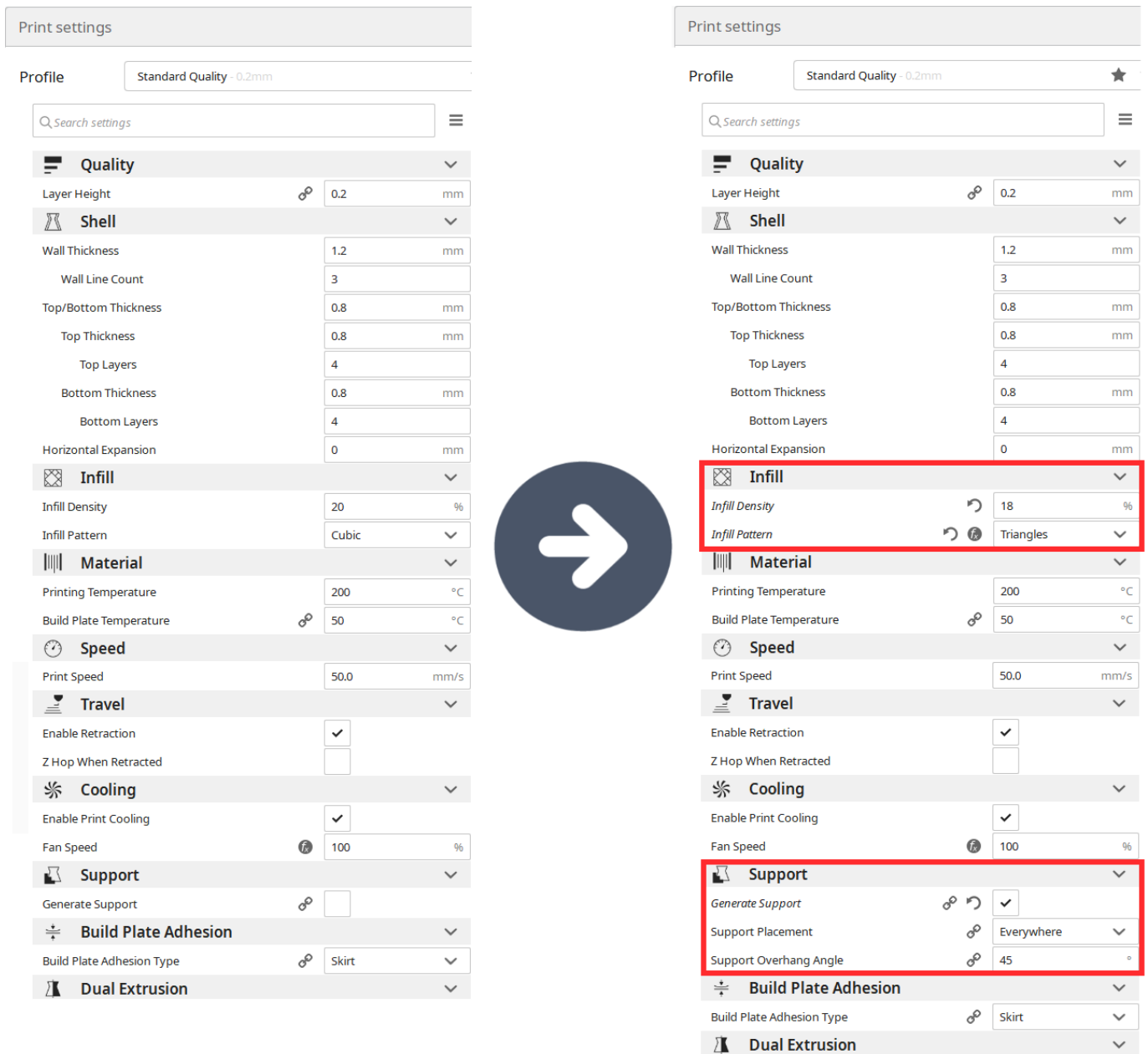


Figura 45. Menú básico de ajuste de Ultimaker Cura 4.5 (Ultimaker, 2020). A la izquierda se ven los ajustes de base propuestos por el programa para la Creality Ender 3, y a la derecha los ajustes básicos retocados por los autores para la realización final de las piezas humerales del brazo de impresión 3D de este trabajo. En esta impresora no existe extrusión dual, por ello dicho menú aparece vacío.

Cuando vamos a trabajar en Cura, una vez hechos los ajustes, lo primero que encontramos es una interfaz con una peana vacía y una estructura cúbica sobre ella. Esto representa, respectivamente, la base o cama de impresión de nuestra impresora y el espacio que se tienen para imprimir sobre ella. Se puede ver la pantalla de pre-impresión con los ajustes hechos para nuestra impresora en la [Figura 46](#).

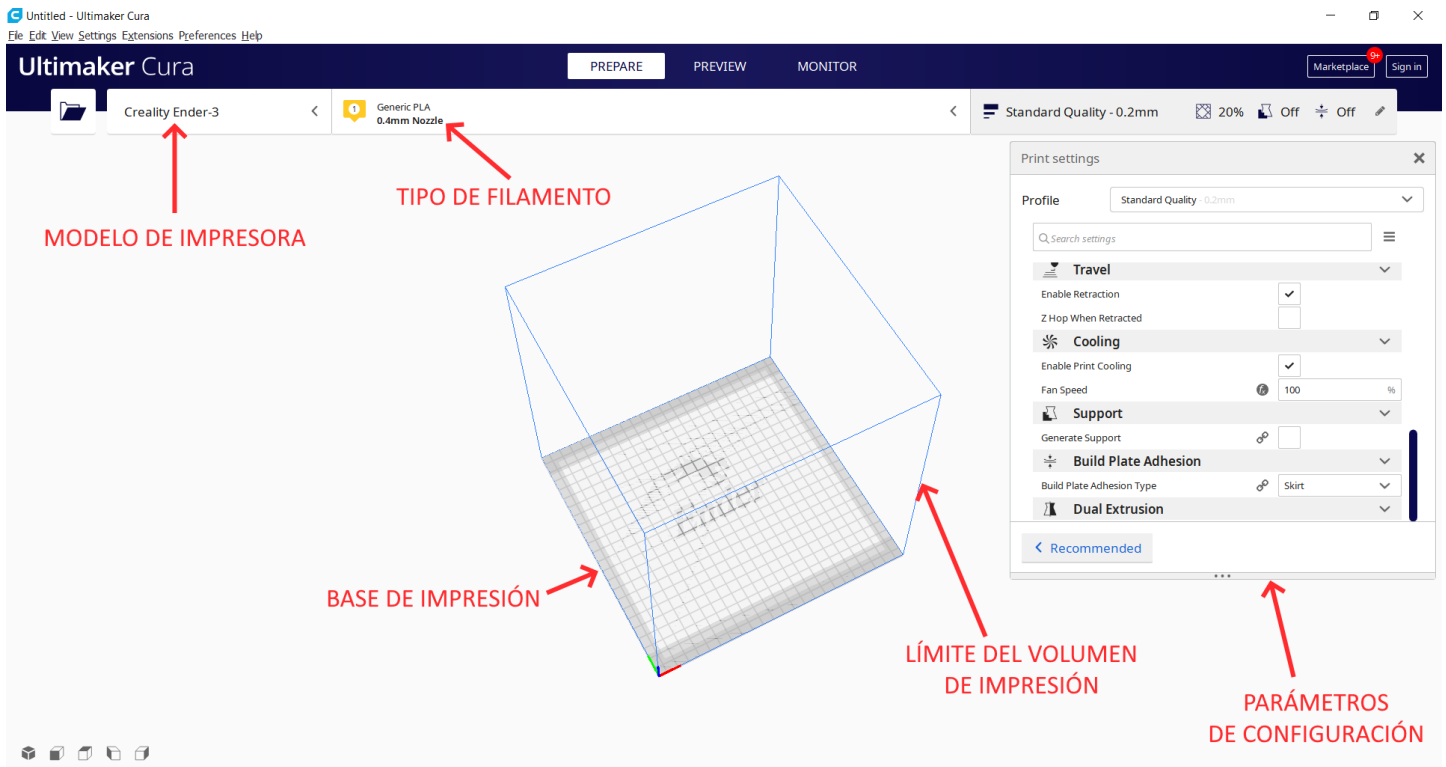


Figura 46. Menú inicial de Ultimaker Cura. Se puede apreciar cómo se ha configurado para el modelo de impresora Creality Ender 3, apareciendo en consecuencia su iconografía en la base de impresión. Se ha ajustado para un nozzle o filamento de PLA de 0.4mm en punta de extrusor. Se puede ver el volumen máximo de impresión delimitado por un cubo sobre la base. Se aprecia, además, el menú desplegable de ajuste de parámetros.

Lo primero que se hará será importar el archivo STL resultante del tratamiento previo con InVesalius y Meshmixer (visto en [III.4.2 Diseño de húmeros en 3D: InVesalius y Meshmixer](#)). Al importar el modelo y hacer clic sobre él se podrá manipular en el espacio y ajustarlo en base a nuestras preferencias. En esta fase todavía se podrán hacer pequeños retoques de los parámetros de la impresión.

Como norma general, se debe buscar la posición de impresión más estable posible para conseguir que la impresora no falle durante el proceso de impresión. Uno de los fallos más frecuentes es precisamente por mala posición o sustento del modelo, lo cual puede dar lugar a que se mueva de su ubicación o a que la punta del extrusor choque contra el modelo y se pierda la continuidad de la impresión.

Una de las medidas que se debe llevar a cabo para evitar que esto suceda es colocar el modelo de forma que tenga una base de sustentación lo más ancha posible y un centro de gravedad lo más bajo posible. Dicho de otra manera, se deberá “tumbar” el modelo para imprimirlo, ya que muchas veces los soportes no son suficiente para evitar los fallos descritos. En la [Figura 47](#) y [Figura 48](#) se pueden ver los pasos a realizar hasta la impresión descritos en profundidad. En el apartado [III.7.2 Impresión de los modelos en 3D](#) se hablará de los fallos que nos encontramos en nuestro experimento durante la impresión y como prevenirlos.

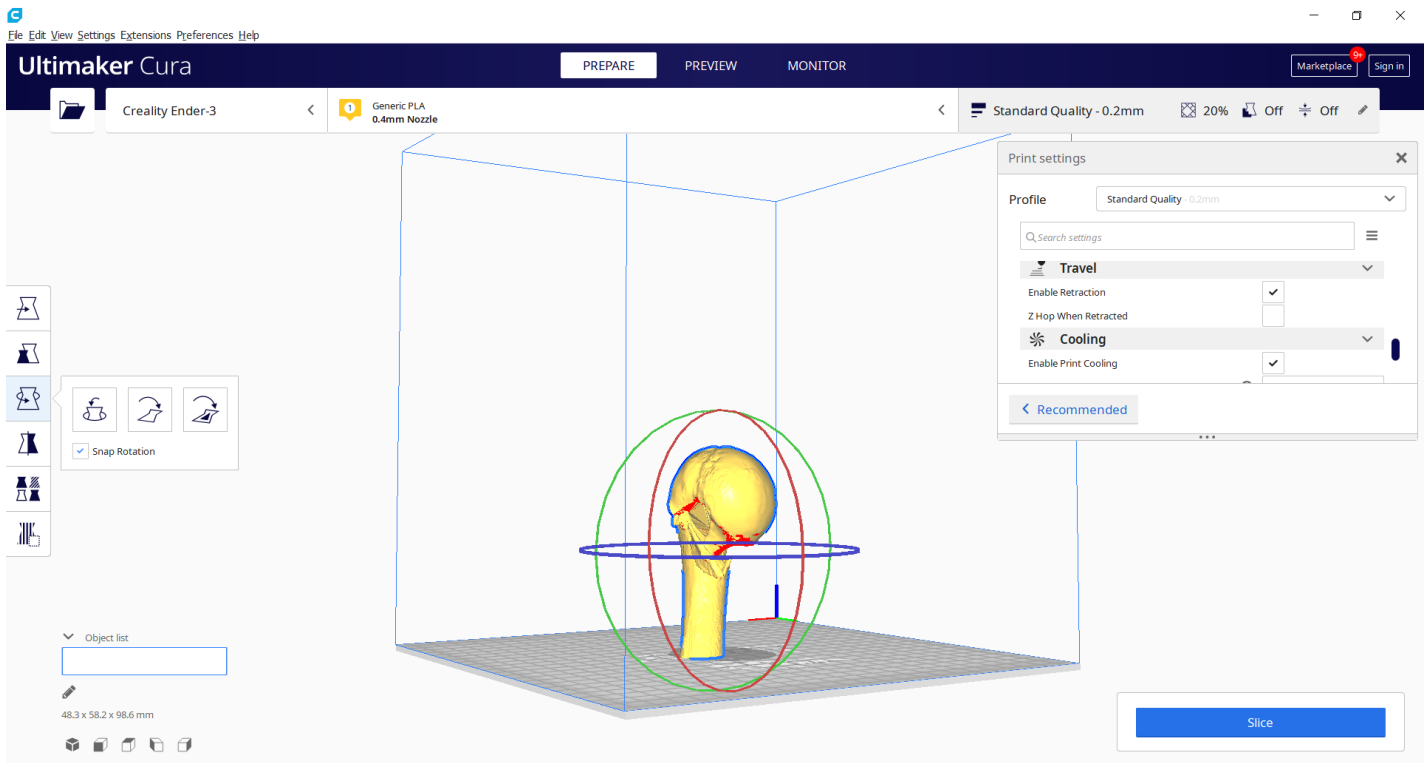


Figura 47. Importación del STL. Se podrá ver el archivo introducido dentro del área de impresión en su posicionamiento original. Una vez importado, al dar clic sobre el modelo se activa el menú a la izquierda, el cual habilita una serie de opciones para alterar el tamaño y posición, entre otros, del modelo. En la imagen se ve activada la opción de giro en el espacio, y alrededor del modelo aparecen tres círculos que nos permiten realizar giros en el eje X, Y y Z. Se pueden ver áreas rojas en la parte inferior del modelo, que hacen alusión a la zona donde se generarán soportes según la configuración que se han establecido. Abajo a la derecha se aprecia la opción “slice”, que nos dará un cálculo de los requerimientos de la impresión de los elementos que tengamos actualmente dentro del área de impresión.

Durante este procesamiento se puede hacer cambios en el tamaño y posición del modelo que estamos tratando mediante el menú de la izquierda. Además, se pueden imprimir varios modelos a la vez, siempre y cuando quepan dentro del área de impresión.

Una vez tumbado el modelo, habrá que calcular el tiempo y gasto de material de impresión, dándole al botón “Slice”, que aparece en la [Figura 47](#). Cuando tengamos el resultado, como se puede ver en la [Figura 48](#), aparecerá la opción de guardar el archivo en la parte inferior derecha de la pantalla de trabajo.

De este modo, se exportará el archivo en un formato llamado G-Code File o .gcode. Estos archivos no son más que una traducción del STL a la cual se le agregan las instrucciones que debe seguir la impresora para obtenerlo (cómo se debe mover el extrusor y, sincrónicamente, la cantidad de filamento que debe extrudir).

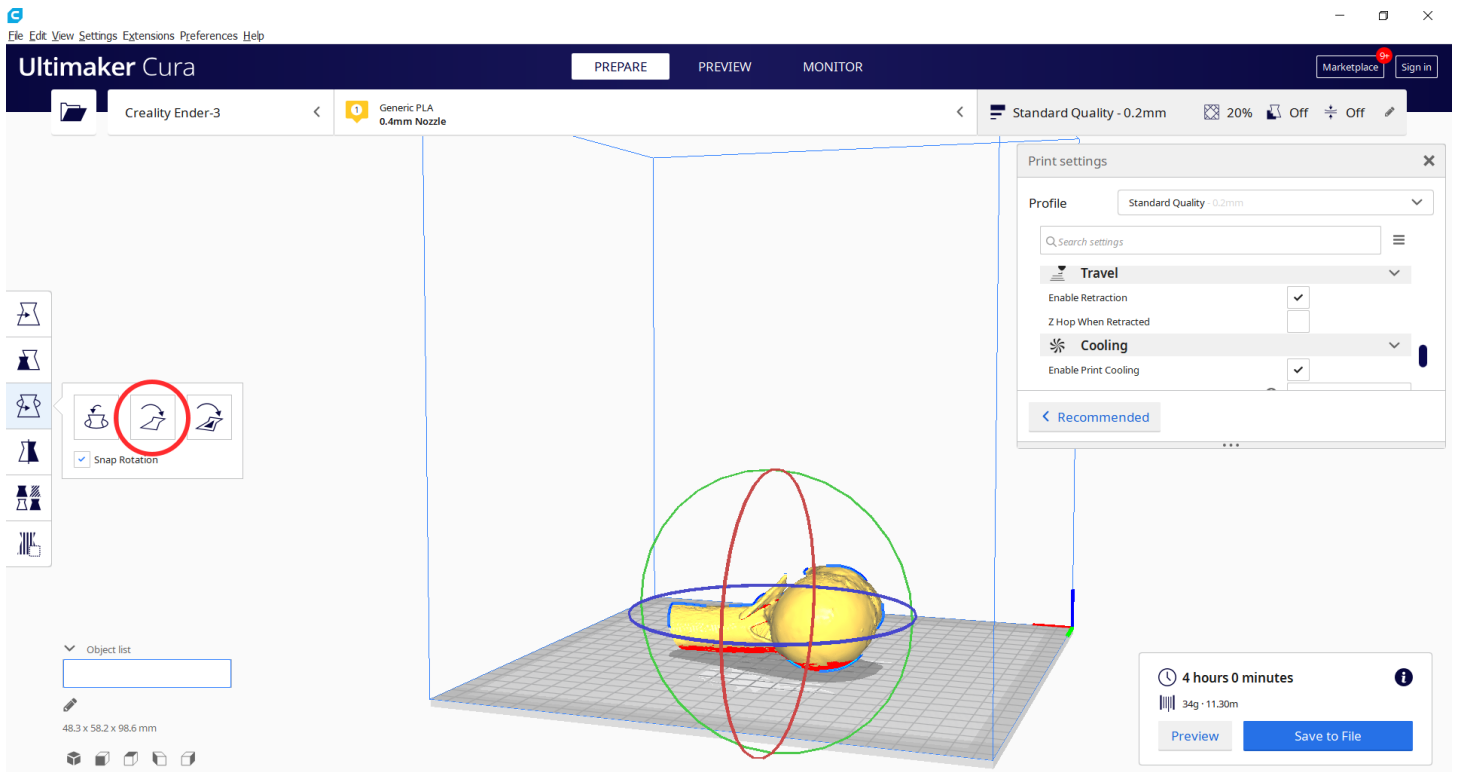


Figura 48. Posicionamiento del modelo. Se ha tumbado el modelo girando el círculo verde a su alrededor. Una vez en la posición que se desea, presionamos el botón “lay flat”, remarcado con un círculo rojo, para terminar de perfeccionar el posicionamiento. Al darle a Slice, el programa nos calcula un tiempo aproximado de impresión de 4 horas, con un gasto de 34g de filamento, que equivalen a 11,30 metros del mismo. Al darle clic al botón “Save file” se generará un .gcode para imprimir justamente esa pieza en esa posición en nuestra Creality Ender 3 v2.

Los húmeros fueron impresos en tamaño 1:1, lo cual implicaba que el tamaño de los mismos sería muy variable. Este hecho se reflejará mucho mejor en la [Figura 53](#), donde se podrán ver todos los húmeros juntos.

Lo que se quiere remarcar con lo previo, es que el gasto de filamento y de tiempo por cada húmero fue muy variable, yendo desde las dos horas y cuarto del modelo más pequeño hasta las 12 horas y media del modelo de mayor tamaño

En total, se hizo una estimación aproximada y se calculó que en este experimento se invirtió un total de unas 240 horas de impresión, gastándose un total de 1.3 kilogramos de PLA. Esto se traduce aproximadamente en un gasto de electricidad de unos 4€ y en un gasto en filamento de unos 25-30€ según el proveedor. Además, existen una serie de sobrecostes derivados del mantenimiento de la impresora y otros fungibles que aumentan discretamente este presupuesto (pegamento de barra, recambios de componentes, limpiadores y engrasadores específicos...). Estos precios lo convierten, sin duda, en una tecnología viable y asumible desde el punto de vista de la planificación quirúrgica.

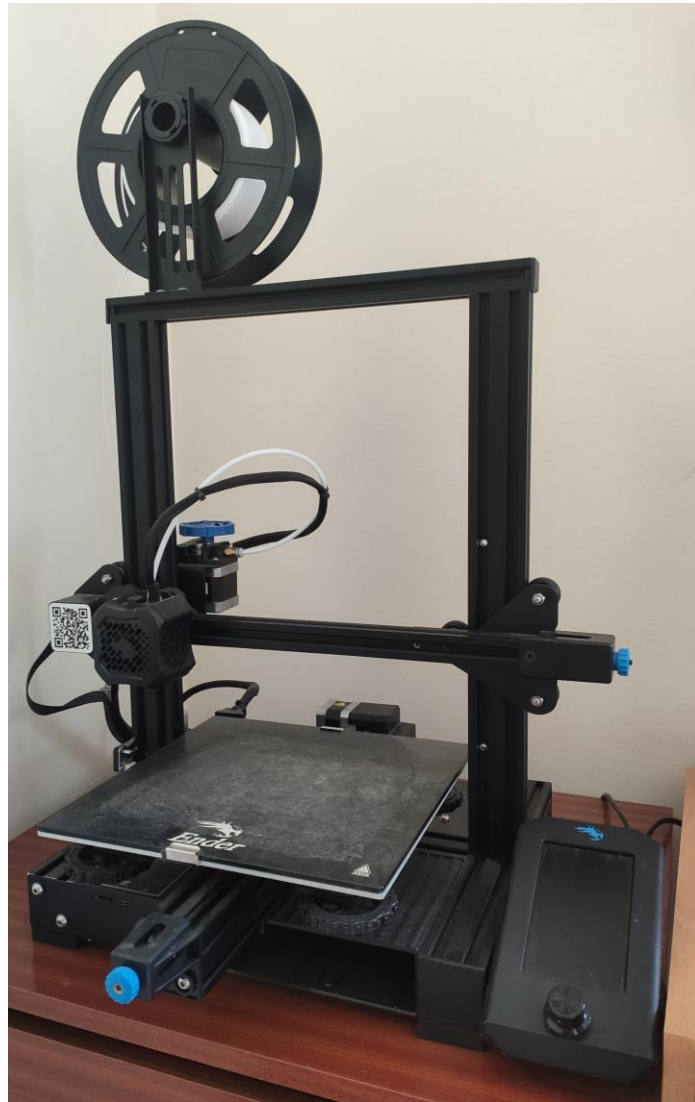
### III.7.2 Impresión de los modelos en 3D

Como se ha comentado previamente, la impresora utilizada para el experimento fue una Creality Ender 3 v2, una impresora desarrollada por la marca Creality que se caracteriza por unos acabados con materiales metálicos firmes y, sobretodo, por su facilidad de montaje y gran versatilidad a la hora de recambiar piezas – Open Source. Dicho de otra manera, es una impresora muy fundamentada en esa idea del RepRap que ya mencionábamos en el apartado [I.3.1 Antecedentes históricos \(de la impresión 3D\)](#).

Esta impresora presenta las siguientes características, piezas y especificaciones técnicas de base, además de una modificación realizada por nuestro equipo ([Figura 49](#)):

- Tipo de extrusión: FDM con Sistema Bowden. Tensionado mediante sistema de correas del eje XY
- Volumen de construcción: 220 x 220 x 250 mm.
- Diámetro filamento: 1,75 mm con las tubuladuras originales incluidas
- Diámetro boquilla: 0.4 mm, intercambiable por otras boquillas
- Espesor de capa: 0.1 – 0.35 mm. Con precisión: +/-0.1 mm.
- Temperatura máxima extrusor: 255 °C. Extrusor con ventilador asociado.
- Temperatura máxima de cama: 110 °C. Cristal de carburo de silicio.
- Velocidad máxima de trayecto: 180 mm/s.
- Formatos modelo 3D: STL, OBJ, G-Code
- Chasis: Perfiles V-Slot de aluminio con rieles guiados en V.
- Peso: 8.6 Kg.
- Entrada / Salida: AC 100-265V 50-60Hz con alimentación Safety Mean Well./ 24V 15A 360W.
- Sujeción de la cama mediante un sistema de muelles: Este sistema fue cambiado por unos muelles de mayor resistencia para favorecer la sujeción.
- Cebador automático del filamento con paso de rosca suave.
- Buses estándar de conexión aportados por la casa Creality
- Computadora integrada en la impresora para gestión de las impresiones y configuración

Como se puede leer en las características, se respetó el diseño original planteado por la propia casa comercial, salvo por el intercambio de los muelles de sostén de la camilla caliente por otros de mayor resistencia que favorecieran el calibrado más fácil y resistente en el tiempo.



*Figura 49. Impresora utilizada para el experimento. Se puede ver la impresora Creality Ender 3 v2 con todas las piezas originales, salvo unos muelles situados por debajo de la cama térmica que fueron sustituidos para favorecer la resistencia y la calibración.*

En resumidas cuentas, el proceso de impresión consiste en la introducción del archivo .gcode a través de un USB en la impresora y, mediante la consola integrada, la ejecución del mismo. La impresora realiza un proceso de calentado del filamento que se encuentra cebado en el extrusor hasta conseguir llevarlo a su temperatura de fusión, predefinida en Cura en base al tipo de material usado. El extrusor va moviéndose sobre la cama caliente, que recibe el filamento de una manera ordenada y en cantidades adecuadas para ir imprimiendo capa a capa el modelo de abajo hacia arriba. De esta manera, el concepto de esta impresora es una impresión vertical que va “desde los cimientos hasta el tejado” del modelo.

Antes de realizar la impresión de cada uno de los modelos, fue necesario realizar una calibración apropiada de la cama, para evitar errores durante la impresión. Algunos de los errores más comunes con las impresoras en 3D son los siguientes:

- Impresión irregular: suele darse por una mala calibración, sobre todo por alteraciones en el ritmo de extrusión de la máquina. En casos de irregularidad, lo más indicado es revisar el extrusor, recambiar la boquilla de extrusión en caso de estar quemada y asegurarse de que existe una buena tensión en las bandas que ayudan a desplazar el extrusor.
- Desplazamiento en las capas iniciales: suele deberse a una mala adherencia de la primera capa del material sobre la cama térmica. Esto puede ser secundario a un mal calentamiento de la cama o a una mala calibración de la misma, debiéndose arreglar dichos problemas. Además, es altamente recomendable utilizar adhesivos sobre la cama de cara a evitar esta alteración, por ejemplo, pegamento, laca...
- Warping y cracking: son levantamientos en las zonas límite de impresión en distintas capas. Suceden por un cambio de temperatura extremo entre el extrusor y el medio, siendo especialmente típico en impresoras “abiertas” en época invernal. Es necesario intentar mantener una temperatura homogénea entre el extrusor y el medio, ya sea con calefacciones externas, campanas o aumentando la temperatura de la cama. Otras medidas útiles pueden ser el aumento de la base de sustentación o la disminución del relleno.
- Deshilachado y “encordamiento”: puede ocurrir y su mayor problema es que haya enganches con el extrusor que puedan comprometer tanto la pieza a imprimir como la propia impresora. Si aparecen, será necesario aumentar la presión de extrusión y limpiar o cambiar nuestra boquilla. Aunque muchas guías recomiendan la limpieza de boquillas con agujas, el escaso coste de las mismas (a penas 40 céntimos por unidad) invita a cambiarlas para no asumir riesgos que puedan estropear el extrusor.

Existen otros múltiples fallos más específicos y menos convencionales que, como en cualquier sistema tecnológico, tendrán una solución propia para cada uno.

Para evitar estos errores, realizamos una serie de pruebas preliminares antes de empezar a imprimir los húmeros, con algunos modelos de prueba recomendados por la marca por la riqueza de patrones de los mismos, como el clásico perro de Creality, descargable en el siguiente enlace: <https://www.thingiverse.com/thing:2879047>.

En una fase preliminar, se debutó con una tasa de fallo del 80% de los 10 primeros intentos de impresión. Tras varios ajustes y depurado de la técnica, se consiguió en las siguientes 20 impresiones bajar esta tasa considerablemente. Finalmente, durante el experimento existió una tasa de fallo de aproximadamente el 20%, lo cual consideramos un resultado aceptable respecto a la tasa de fallo propia de esta tecnología, quizás algo elevado. De los 6 húmeros con fallos, 5 fueron totalmente inviables y se desecharon. Uno de ellos sólo presentó un fallo sutil que pudo ser retocados con un bolígrafo de impresión 3D manual sin comprometer el aspecto respecto al diseño original. Se puede ver uno de los fallos críticos durante la impresión de uno de los húmeros en la [Figura 50](#).



*Figura 50. Fallo crítico de impresión durante la preparación de los modelos humerales. Fallo “en spaghetti”, consistente en una pérdida del “hilo de impresión”, dejándose de imprimir sobre el riel que marcan las capas previas y empezando a imprimir al aire, creándose una maraña. En este caso, bastó con ajustar el calibrado de la cama y añadir más adhesivo a la misma para conseguir que, al siguiente intento, el modelo se imprimiera con éxito.*

Para conseguir mantener la impresora a punto y que no cometa fallos, habrá que utilizar una serie de artilugios asociados que se verán descritos en la [Figura 51](#), implicados en el mantenimiento de la impresora y retoque final de las piezas impresas. Existen otras opciones de postprocesado para conseguir un acabado mejor de los modelos, como son el limado, tratamiento térmico y químico, pero en nuestro experimento no se consideraron necesarios ni producentes.

Si conseguimos mantener a raya todos los errores descritos y realizamos un buen mantenimiento de la impresora, nuestra tasa de éxitos durante la impresión de modelos será optimizada al máximo nivel. En la [Figura 52](#) se puede apreciar cómo se da el proceso correcto de impresión con uno de los modelos humerales.



Figura 51. Materiales accesorios al proceso de impresión 3D. Se puede ver su descripción en la propia imagen. Sólo cabría destacar que el bolígrafo 3D funciona igual que una impresora 3D manual.



Figura 52. Proceso de impresión de uno de nuestros modelos. Se puede apreciar un primer círculo externo de calibrado y los soportes en la zona inferior del eje Z, que después se retirarán fácilmente con los alicates.

### III.7.3 El entorno del experimento

El experimento fue llevado a cabo en una sala del hospital, intentando minimizar las distracciones y crear un entorno de entrevista idóneo. Todas las entrevistas se realizaron en habitaciones con una silla y una mesa de gran amplitud que permitiera la colocación de todo el material necesario para el test, a saber:

- Modelos impresos en 3D humerales: un total de 34 modelos equivalentes a los del experimento en Realidad Virtual, se pueden ver en conjunto en la [Figura 53](#). Cada modelo tenía escrito en su base su número correspondiente y su lateralidad.
- Cuatro planchas de esponja con los contornos de las figuras humerales recortadas en ellas: se puede apreciar estas 4 planchas en la [Figura 53](#), encontrándose todos los modelos humerales impresos embutidos en las mismas. En las planchas se puede apreciar, de nuevo, escrito el número referencia de cada uno de los húmeros y la letra “I” de “Izquierdo” o “D” de “Derecho”.
- Dos láminas a color A4 plastificadas con las figuras referencia a la hora de clasificar: una para los húmeros derechos y otra para los izquierdos, para evitar sesgos como se explicó previamente. Se sacaron estas láminas porque las respuestas se darían a posteriori en láminas equivalentes, pero más pequeñas, con peor calidad y en blanco y negro, de manera que era recomendable tener estas referencias de buena calidad para evitar fallos inducidos por las mismas. Se puede ver a lámina a color para húmeros izquierdos, por ejemplo, en la [Figura 54](#).
- Un cuadernillo para rellenar las respuestas: compuesto por la parte no evaluable para el experimento en cuestión (portada y escalas de satisfacción-utilidad y confianza, vistos en la [Figura 33](#), [Figura 34](#) y [Figura 35](#)) y una parte evaluable, constituida por una lámina numerada por cada uno de los húmeros, habiendo un total de 34 láminas en orden aleatorizado, como se explica en el apartado [III.5.3 Aleatorización del orden de presentación de los casos](#). Se puede ver un ejemplo en la [Figura 55](#). Cabe recordar que aquí también se respetó la lateralidad, es decir, que los modelos de húmero derecho tenían láminas con imágenes correspondientes a modelos derechos, y lo mismo con los húmeros izquierdos.
- Un bolígrafo: Para rellenar ambas partes del cuestionario y el consentimiento informado previamente al mismo.

Se puede ver que la única diferencia entre las láminas a color y las distintas láminas del cuadernillo de respuestas fue el tamaño, el color y que las primeras no estaban numeradas.

Durante el experimento, el entrevistador estuvo en la sala cronometrando el tiempo y sin intervenir en el desarrollo del experimento para no incurrir en sesgos.

El desarrollo del experimento consistió en ir extrayendo cada húmero, rellenando la ficha correspondiente y volviendo a depositarlo en su misma ubicación correspondiente, hasta finalizar los 34 y dar el alto al cronómetro

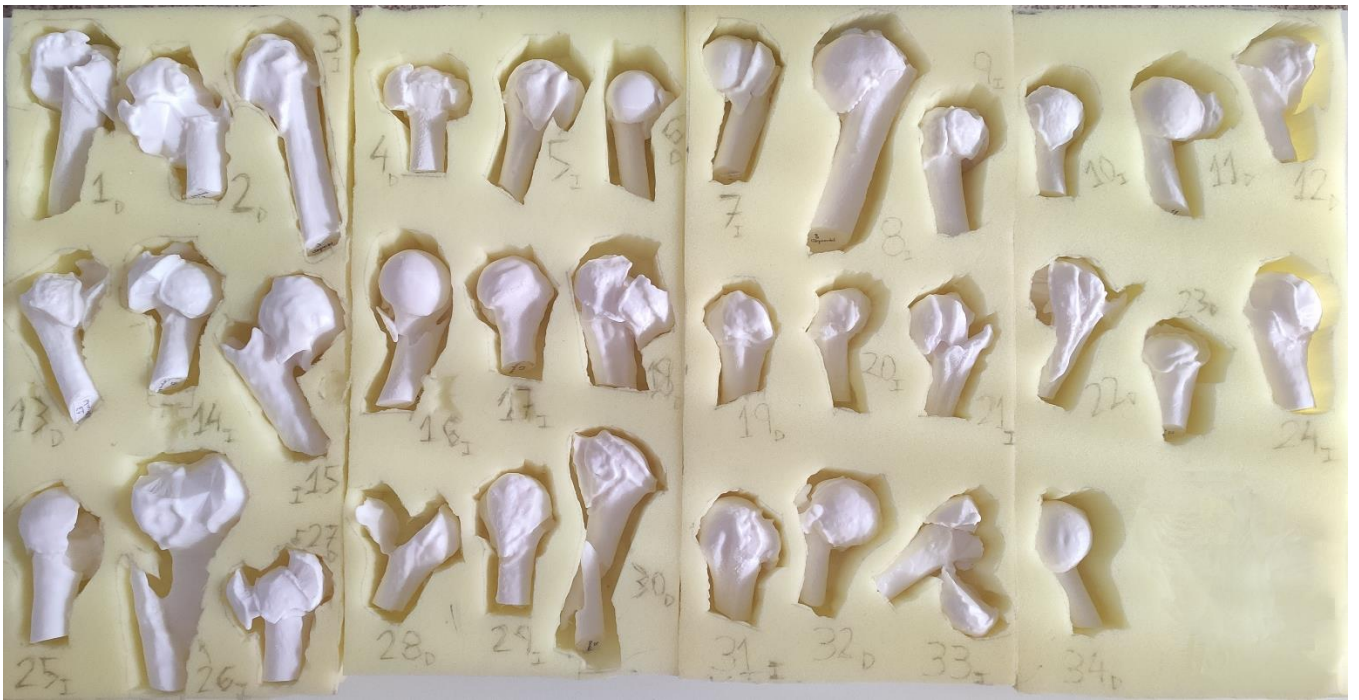
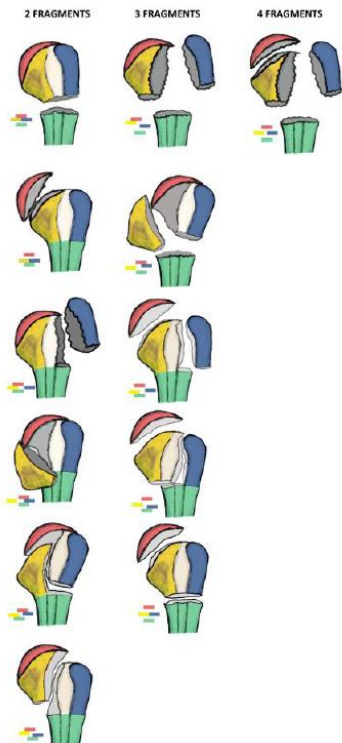
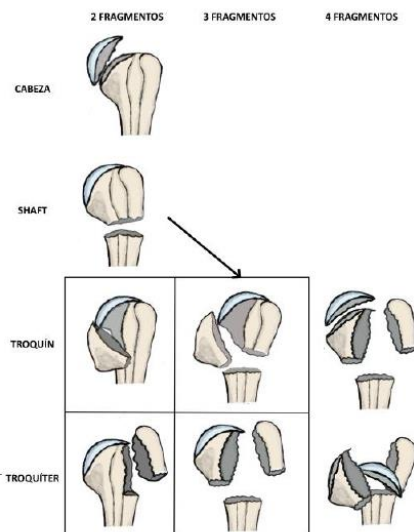


Figura 53. Planchas de esponja con los modelos humerales impresos embutidos en ellas. Se aprecian los húmeros enumerados y con su lateralidad reflejada con una "D" o "I".

1. Clasifique el modelo correspondiente al número del margen inferior derecho por la clasificación HGLS



2. Clasifique el modelo correspondiente al número del margen inferior derecho por la clasificación de Neer

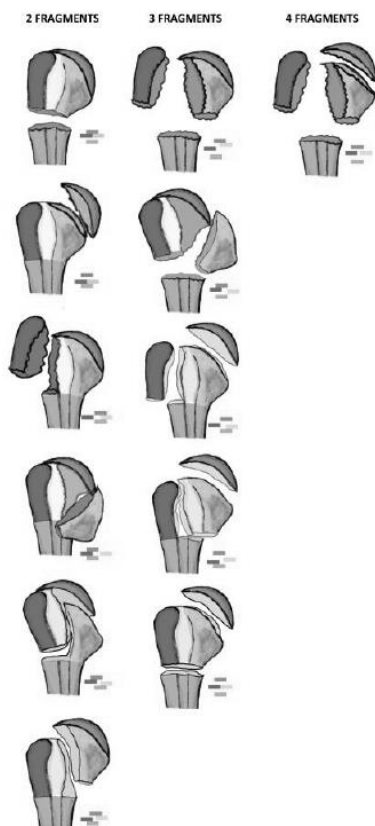


3. ¿Qué tratamiento daría a este caso?

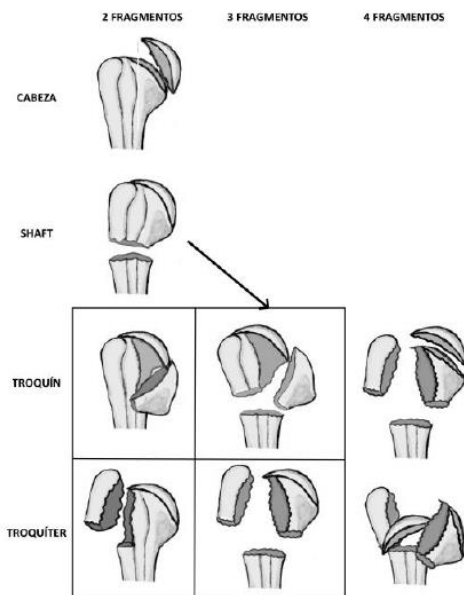


Figura 54. Lámina referencia a color para húmeros izquierdos. Se entrega impresa a color y plastificada en A4 junto con otra equivalente para los húmeros derechos. Hay dos y se usan de manera compartida por los residentes que pasan por el experimento uno a uno.

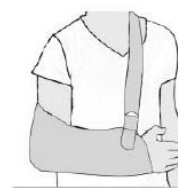
1. Clasifique el modelo correspondiente al número del margen inferior derecho por la clasificación HGLS



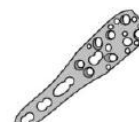
2. Clasifique el modelo correspondiente al número del margen inferior derecho por la clasificación de Neer



3. ¿Qué tratamiento daría a este caso?



Conservador



Osteosíntesis



Artroplastia

1

Figura 55. Ejemplo de lámina impresa para rellenar el cuestionario. Cada residente tenía 34 de ellas, impresas en formato A5, para redondear las opciones deseadas. Por ejemplo, esta era correspondiente al húmero número 1, con lateralidad derecha. Se ve que son exactamente iguales que las láminas de la [Figura 54](#), pero en color y con un número referencia que alude al húmero al que pertenecen. Estas láminas fueron entregadas en un orden aleatorio según lo previamente explicado en el apartado [III.5.3 Aleatorización del orden de presentación de los casos](#). Cada residente debía redondear un húmero concreto en la clasificación de HGLS-Hertel, una de las opciones de encabezamiento de la de Neer (2 fragmentos, 3 fragmentos o 4 fragmentos) y una opción de tratamiento.

Una vez terminado el experimento, se grapaba el cuaderno completo y se daba el número referencia del mismo al residente entrevistado, por si deseaba conocer sus respuestas a posteriori. Este cuaderno quedaba guardado junto con todos los demás.

Una vez terminada la fase de recogida de datos de todos los residentes, se tomaron todos los cuadernos y fueron pasados a la plantilla de Excel correspondiente, al igual que en el caso de los modelos de realidad virtual, iniciándose la siguiente fase del estudio, que se verá en el apartado [III.8 Análisis de los datos obtenidos](#).

### III.7.4 Mecánica de evaluación con los modelos impresos

Aunque en apartados previos se ha explicado todo de forma amplia, en resumidas cuentas, podríamos afirmar que la mecánica de evaluación del brazo del experimento basado en impresión de modelos en 3D fue:

1. Pasos comunes: aleatorización, consentimientos y charla explicativa (ver [III.5.4 Charla de instrucción previa al cuestionario](#)).
2. Colocación de los materiales: planchas de gomaespuma con húmeros, láminas de referencia bilaterales a color, bolígrafo y paquete de láminas impresas numeradas aleatorizadas para rellenar las respuestas a cada húmero.
3. Explicación de la mecánica de funcionamiento de las tarjetas: número de húmero, redondeos en las 3 categorías. Se muestra la trama del trazo de fractura y la referencia del húmero (derecho o izquierdo) tanto en la plancha de gomaespuma como en la base de cada uno.
4. Inicio de la prueba (cronometrada).
5. Resolución de los 34 casos, dando respuesta en cada uno a Neer, HGLS y tratamiento oportuno.
6. Fin de la prueba: se deposita el último húmero en la plancha de gomaespuma y se para el cronómetro.
7. Grapado y codificación alfanumérica del cuadernillo, dándose el número referencia al residente.
8. Una vez recogidos todos los datos del estudio de todos los participantes: paso y ordenamiento de datos en un Excel común codificado para su posterior paso a Stata-Corp.

## III.8. Análisis de los datos obtenidos

### III.8.1 Ordenación y codificación de los resultados

Para trabajar correctamente sobre los datos estadísticos, estos fueron pasados a una tabla de Excel con codificación de cada uno de ellos.

Se puede ver en la [Figura 56](#) una parte de la tabla realizada y los valores, correspondientes al “Usuario 1” entrevistado y a parte del “Usuario 2” (ID), continuando la tabla hasta completar los 36 usuarios.

Se aprecia que existe una fila por cada modelo, lo cual implica que existen múltiples observaciones (un total de 34) por cada sujeto. Esto fue tenido en cuenta desde el punto de vista estadístico, como se explicará en el siguiente apartado.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	ID	Modelo	Grupo	HGLS	Neer	Tratamiento	Edad	Sexo	Año residencia	Nivel Hospital	Tiempo empleado test completo	Experiencia previa	Pregunta satisfacción 1	Pregunta satisfacción 2	Pregunta satisfacción 3	Pregunta de confianza 1	Pregunta de confianza 2
2	1	1	0	1	1	0					1965	4	4	3	7	5	
3	1	2	0	0	0	0					1965	4	4	3	7	5	
4	1	3	0	0	0	0					1965	4	4	3	7	5	
5	1	4	0	0	0	0					1965	4	4	3	7	5	
6	1	5	0	0	1	1					1965	4	4	3	7	5	
7	1	6	0	0	1	1					1965	4	4	3	7	5	
8	1	7	0	1	1	1					1965	4	4	3	7	5	
9	1	8	0	0	0	1					1965	4	4	3	7	5	
10	1	9	0	0	0	0					1965	4	4	3	7	5	
11	1	10	0	0	0	1					1965	4	4	3	7	5	
12	1	11	0	0	1	1					1965	4	4	3	7	5	
13	1	12	0	1	1	0					1965	4	4	3	7	5	
14	1	13	0	0	0	0					1965	4	4	3	7	5	
15	1	14	0	1	1	1					1965	4	4	3	7	5	
16	1	15	0	1	1	1					1965	4	4	3	7	5	
17	1	16	0	0	0	0					1965	4	4	3	7	5	
18	1	17	0	1	1	1					1965	4	4	3	7	5	
19	1	18	0	1	1	1					1965	4	4	3	7	5	
20	1	19	0	0	0	1					1965	4	4	3	7	5	
21	1	20	0	0	0	0					1965	4	4	3	7	5	
22	1	21	0	0	1	0					1965	4	4	3	7	5	
23	1	22	0	0	0	0					1965	4	4	3	7	5	
24	1	23	0	0	0	0					1965	4	4	3	7	5	
25	1	24	0	1	1	1					1965	4	4	3	7	5	
26	1	25	0	1	1	0					1965	4	4	3	7	5	
27	1	26	0	0	1	0					1965	4	4	3	7	5	
28	1	27	0	1	1	0					1965	4	4	3	7	5	
29	1	28	0	1	1	0					1965	4	4	3	7	5	
30	1	29	0	0	1	1					1965	4	4	3	7	5	
31	1	30	0	0	0	1					1965	4	4	3	7	5	
32	1	31	0	0	1	1					1965	4	4	3	7	5	
33	1	32	0	0	0	0					1965	4	4	3	7	5	
34	1	33	0	1	1	1					1965	4	4	3	7	5	
35	1	34	0	0	1	1					1965	4	4	3	7	5	
36	2	1	0	1	1	0					1650	5	5	4	7	8	
37	2	2	0	0	1	0					1650	5	5	4	7	8	
38	2	3	0	1	1	1					1650	5	5	4	7	8	
39	2	4	0	0	0	1					1650	5	5	4	7	8	
40	2	5	0	1	1	1					1650	5	5	4	7	8	
41	2	6	0	1	1	1					1650	5	5	4	7	8	
42	2	7	0	0	0	0					1650	5	5	4	7	8	

... Continúa hasta ID 36 - Modelo 34

Figura 56. Tabla de ordenación de los datos. Se pueden apreciar los datos correspondientes al primer residente entrevistado y a parte del segundo. Las variables y su codificación se explican a continuación. En esta figura pixelamos parte de la tabla para mantener en lo máximo posible la privacidad de cada residente entrevistado y que no haya posibilidad de identificarlo.

En la tabla se aprecian las siguientes variables, que se encuentran codificadas de la siguiente manera:

- ID: Es el número asignado a cada residente entrevistado, del 1 al 36. Se da por orden de realización del test. Cabe recordar que el orden de realización no siguió ningún tipo de patrón.
- Modelo: Es el número asignado a cada uno de los 34 números que vio cada residente. También presentan un orden arbitrario predefinido al inicio del experimento.
- Grupo: Brazo del estudio al que pertenece. 0 = Realidad Virtual o 1 = Modelos impresos en 3D.
- HGLS: lo respondido vs. Comité de Expertos: 0 = Fallo y 1 = Acierto (entre las 12 opciones).
- Neer: lo respondido vs. Comité de Expertos: 0 = Fallo y 1 = Acierto (entre las 3 opciones).
- Tratamiento: lo respondido vs. Lo que se hizo realmente. 0 = Fallo y 1 = Acierto (entre las 3 opciones).
- Edad: del residente entrevistado en años.
- Sexo: del residente entrevistado. 0 = Mujer y 1 = Varón.
- Año de residencia: el cual se encuentre cursando el entrevistado, del 1 al 5.
- Nivel del hospital: Según WHO-CHOICE. 1 = Primer nivel, 2 = Segundo, 3 = Tercero.

- Tiempo invertido en completar el test completo: En segundos para el test completo.
- Experiencia previa: 0 = Ninguna, 1 = Poca (<10 veces) y 2 = Mucha (>10 veces).
- Preguntas de satisfacción-utilidad: 1 = Muy insatisfecho, 2 = Insatisfecho, 3 = Neutral, 4 = Satisfecho, 5 = Muy satisfecho.
- Preguntas de confianza: del 0 al 10, siendo 0 = Nada de confianza y 10 = Confianza absoluta.

Cabe decir que lo primero que se hace es enfrentar los datos de los expertos de Neer, HGLS y Tratamiento, codificando el Excel con la secuencia de prueba lógica: celda de respuesta de Comité de Expertos = celda de respuesta del residente. Si verdadero = 1, si falso = 0. Después, se pasarán todos los datos a la tabla de la forma relatada.

#### III.8.2 Análisis estadístico

Las características de los participantes se presentan según la asignación del grupo de prueba. Realizamos análisis descriptivos sobre los resultados y las covariables. Las variables numéricas se describen mediante medias y desviaciones estándar, y las variables categóricas se describen mediante frecuencias absolutas y relativas.

Las comparaciones de grupos se llevaron a cabo utilizando la prueba de Mann-Whitney, la prueba t de Student o la prueba exacta de Fisher, según corresponda. Evaluamos las asociaciones entre la variable de resultado binaria (clasificación correcta) y la asignación de grupo (VR/3DPM) utilizando modelos de regresión logística de efectos mixtos ajustados por edad, sexo y posibles variables de confusión para garantizar que las variables adicionales no afecten significativamente los resultados estadísticos, obteniendo resultados como Odds Ratio (OR).

Los factores de confusión potenciales se incluyeron en el modelo cuando se asociaron con la variable de resultado a un nivel de significación estadística  $p < 0,25$ . Se incluyó una intercepción aleatoria para tener en cuenta la correlación entre las mediciones en el mismo sujeto [Hosmer et al., 2013]. Todas las pruebas estadísticas fueron bilaterales y los valores de  $p < 0,05$  se consideraron estadísticamente significativos. Todos los análisis estadísticos se realizaron con Stata 17.0 (StataCorp LLC).

Este análisis fue realizado sobre un total de 1224 observaciones de números proximales, es decir, 34 respuestas dadas por cada uno de los 36 residentes.



## IV. Resultados

### IV.1. Homogeneidad de los grupos

El primer paso que se realizó fue la comprobación sobre la homogeneidad de los grupos, para comprobar que no existían diferencias significativas entre los mismos que pudieran suponer un sesgo por un factor de confusión. Además, los resultados obtenidos se aplicarían a posteriori para realizar un análisis ajustado multivariante.

Las variables comparadas entre los grupos de Figuras impresas en 3D y Realidad Virtual fueron edad, género, tiempo de residencia (años), nivel hospitalario, nivel de residencia, experiencia previa con la tecnología del grupo que les hubiera tocado y tiempo dedicado a completar las evaluaciones. Todos estos factores fueron tenidos en cuenta y considerados como potenciales factores de confusión. Tal y como se puede ver en la [Tabla 3](#), no hubo diferencias estadísticamente significativas respecto a los mencionados factores en ninguno de los grupos.

Característica	Participantes de Realidad Virtual	Participantes de modelos impresos en 3D	Valor p
n	18	18	
<b>Edad (años)</b>	27.6 (1.9)	27.9 (2.4)	0.858 <sup>a</sup>
<b>Tiempo de residencia (años)</b>	3.1 (1.5)	2.8 (1.4)	0.572 <sup>a</sup>
<b>Tiempo usado (minutos)</b>	31.5 (11.6)	32.5 (13.4)	0.801 <sup>b</sup>
<b>Sexo (% hombres)</b>	55.6	83.3	0.146 <sup>c</sup>
<b>Nivel Hospitalario</b>			
<b>Primer nivel</b>	16.7	11.1	0.817 <sup>c</sup>
<b>Segundo nivel</b>	44.4	38.9	
<b>Tercer nivel</b>	38.9	50.0	
<b>Experiencia previa (%)</b>			
<b>Ninguna</b>	66.6	50.0	0.271 <sup>c</sup>
<b>Poca (&lt;10 veces)</b>	27.8	22.2	
<b>Mucha (≥ 10 veces)</b>	5.6	27.8	

Datos dados como media (desviación estándar) o %.

<sup>a</sup> Test de la U de Mann-Whitney

<sup>b</sup> Test de la T de Student

<sup>c</sup> Prueba exacta de Fisher

Tabla 3. Características de los participantes en base al grupo del ensayo asignado aleatoriamente.

Dentro del grupo de Figuras Impresas en 3D (n=18), 15 de los encuestados se identificaron como masculinos y 3 de ellos como femeninos, con una edad promedio dentro del grupo de encuestados de 27,9 años y una Desviación Estándar de 2,4 años.

Dentro del grupo Realidad Virtual (n=18), 10 de los encuestados se identificaron como masculinos y 8 de ellos como femeninos, con una edad promedio dentro del grupo de encuestados de 27,6 años y una Desviación Estándar de 1,9 años.

El promedio de tiempo de residencia fue de 2,8 años, con desviación estándar de 1,4 años para el grupo de Figuras Impresas en 3D, frente a los 3,1 años (desviación estándar de 1,5 años) para los del grupo de Realidad Virtual, pudiéndose apreciar un desglose detallado del año de residencia y el tipo de hospital en la [Tabla 3](#).

No se encontraron diferencias significativas en ninguna de las variables analizadas previamente mencionadas en este apartado al respecto de la homogeneidad de los grupos. Por lo tanto, se puede concluir que los participantes de ambos grupos muestran homogeneidad en lo que respecta a estas variables.

Respecto al tiempo invertido en el cuestionario para los diferentes grupos, ambos grupos dedicaron una cantidad de tiempo similar a analizar los 34 húmeros, con un tiempo total promedio de 32,5 (Desviación estándar = 13,4 minutos) para el grupo de Figuras Impresas en 3D y de 31,5 minutos (Desviación estándar = 11,6 minutos) para el grupo de Realidad Virtual. Esta diferencia tampoco fue estadísticamente significativa, aunque sus resultados orientan a una mayor rapidez del grupo de realidad virtual.

## IV.2. Estudio individual por subgrupos de tasa de acierto

### IV.2.1 Tasa de acierto en base a características de entrevistados

Para estudiar el impacto del uso de Figuras Impresas en 3D versus Realidad Virtual en la precisión a la hora de clasificar las fracturas, investigamos lo que llamamos “tasa de clasificación correcta” (o precisión) en relación con las consideradas como respuestas válidas (clasificaciones de expertos) según dos métodos de clasificación (Neer y HGLS).

A este respecto, no sólo se tuvo en cuenta cómo las distintas tecnologías podían influir en la tasa de acierto (precisión), sino que se tuvo en cuenta cómo otros factores podían influir en la misma. De este modo, obtuvimos un modelo realista de cómo se estructuraban las distintas tasas de acierto en base a distintas variables, y no sólo a la tecnología de cada uno de los dos brazos principales del estudio. Algunos de los valores que se tomaron en cuenta fueron el sexo, nivel hospitalario, año de residencia o experiencia previa. La influencia de cada uno de estos factores puede apreciarse en la [Tabla 4](#).

Característica	Aciertos en clasificación de HGLS		Aciertos en clasificación de Neer	
	N (%)	p <sup>a</sup>	N (%)	p <sup>a</sup>
<b>Grupo</b>				
Realidad Virtual	317 (51.8)	0.169	397 (64.9)	0.365
Impresión 3D	342 (55.9)		413 (67.5)	
<b>Sexo</b>				
Hombre	465 (54.7)	0.384	569 (66.9)	0.395
Mujer	194 (51.9)		241 (64.4)	
<b>Nivel hospitalario</b>				
Primer nivel	96 (56.5)	0.193	108 (63.5)	0.601
Segundo nivel	259 (50.8)		335 (65.7)	
Tercer nivel	304 (55.9)		367 (67.5)	
<b>Año de residencia</b>				
Primero	115 (48.3)	<0.001	146 (61.34)	0.005
Segundo	119 (43.8)		161 (59.2)	
Tercero	144 (60.5)		168 (70.6)	
Cuarto	137 (57.6)		163 (68.5)	
Quinto	144 (60.5)		172 (72.3)	
<b>Experiencia previa</b>				
Ninguna	356 (49.9)	0.001	454 (63.6)	0.026
Poca (<10 veces)	171 (55.9)		206 (67.3)	
Mucha (≥ 10 veces)	132 (64.7)		150 (73.5)	

Los resultados estadísticamente significativos quedan resaltados en dorado ( $p < 0.05$ ).

Datos dados como media (desviación estándar) o %.

<sup>a</sup> Prueba exacta de Fisher

Tabla 4. Asociación entre las características de los participantes y la tasa de acierto.

En cuanto a la comparación entre ambas tecnologías, el uso de Figuras impresas en 3D mostró una mayor precisión a la hora de clasificar fracturas de húmero proximal correctamente que la Realidad Virtual tanto para la clasificación HGLS (51,8 % frente a 55,9 %) como para la clasificación de Neer (64,9 % frente a 67,5 %). Sin embargo, estas diferencias no fueron estadísticamente significativas ( $p=0,169$  para HGLS y  $p=0,365$  para Neer). De este modo, tal y como se remarcará en los sucesivos apartados, se puede inferir que, en base a estos resultados, la realidad virtual se puede considerar no inferior a la impresión en 3D en este menester.

Por otra parte, de los datos analizados y reflejados en la [Tabla 4](#), cabe destacar dos hallazgos que se resaltarán en los siguientes párrafos:

- Respecto al año de residencia: los participantes con más experiencia profesional realizaron clasificaciones con mayor precisión que aquellos con menos recorrido laboral. La experiencia profesional, medida en año de residencia, tuvo un impacto significativo directamente proporcional a la precisión de la clasificación para Neer ( $p < 0,001$ ) y HGLS ( $p = 0,005$ ). Este hecho presenta coherencia científica (criterio de Bradford Hill).
- Respecto a la experiencia previa con la tecnología utilizada (Impresión en 3D o Realidad Virtual): como de nuevo era esperable, también apareció una asociación estadísticamente significativa y directamente proporcional entre la experiencia y la tasa de aciertos para ambos brazos del estudio y ambas clasificaciones (HGLS y Neer). Para HGLS, la diferencia en la precisión entre ninguna experiencia previa (49,9 %), poca experiencia (55,9 %) y alta experiencia (64,7 %) tuvo un rango de 14,8 % de ninguna a mucha experiencia ( $p < 0,001$ ). La diferencia entre las mismas características de experiencia para Neer fue del 9,9% (no experiencia = 63,6%, baja experiencia = 67,3%, alta experiencia = 73,5%;  $p = 0,026$ ). Estos resultados indican que la familiaridad con la tecnología utilizada para mostrar la fractura juega un papel en la capacidad de clasificar con precisión la fractura.

El hecho de aparecer estos dos resultados, que son consistentes con la lógica, aporta bajo nuestro punto de vista una mayor solidez a nuestro estudio.

#### IV.2.2 Tasa de acierto en base a otras covariables numéricas

Además de las variables previamente mencionadas, se hizo un análisis equivalente para las covariables numéricas o cuantitativas “edad” y “tiempo dedicado al test”, que se puede apreciar en la [Tabla 5](#).

Ninguna de las dos demostró influir de manera estadísticamente significativa en la tasa de aciertos para ninguna de las clasificaciones (Neer o HGLS).

	HGLS			Neer		
	Acierto N=659	Error N=565	p <sup>a</sup>	Acierto N=810	Error N=414	p <sup>a</sup>
<b>Edad (en años)</b>	27.8 (1.9)	27.7 (2.3)	0.566	27.8 (2.0)	27.7 (2.3)	0.473
<b>Tiempo invertido total (en minutos)</b>	32.5 (12.2)	31.4 (12.2)	0.117	32.2 (12.3)	31.7 (12.0)	0.480

Datos dados como media (desviación estándar) o %.

<sup>a</sup> Prueba de la T de Student

Tabla 5. Asociación entre las covariables numéricas y la tasa de acierto.

### IV.3. Significación y comparación de la tasa de aciertos entre grupos

Se estimó la Razón de Probabilidades u Odds Ratio (OR) con un ajuste multivariante para la tasa de acierto de la clasificación de fracturas de húmero proximal. Este ajuste se realizó por sexo, edad, nivel hospitalario, año de residencia, experiencia previa con la tecnología pertinente y tiempo dedicado a la prueba. El valor de estas asociaciones para con la tasa de acierto se ve reflejado en la [Tabla 6](#), y se muestra consonante a lo esperable según lo reflejado en apartados previos.

Variable	Clasificación HGLS		Clasificación de Neer	
	OR (95% IC)	p <sup>a</sup>	OR (95% IC)	p <sup>a</sup>
<b>Grupo</b>				
<b>Realidad Virtual</b>	Referencia	0.513	Referencia	0.630
<b>Modelos Impresos en 3D</b>	1.14 (0.77-1.67)		1.08 (0.79-1.48)	
<b>Edad (años)</b>	0.99 (0.89-1.11)	0.852	0.98 (0.90-1.07)	0.676
<b>Sexo</b>				
<b>Mujer</b>	Referencia		Referencia	
<b>Hombre</b>	0.99 (0.63-1.55)	0.384	1.09 (0.76-1.56)	0.654
<b>Nivel Hospitalario WHO-CHOICE</b>				
<b>Primer Nivel</b>	Referencia		Referencia	
<b>Segundo Nivel</b>	0.96 (0.55-1.68)	0.885	1.29 (0.82-2.02)	0.273
<b>Tercer Nivel</b>	0.89 (0.50-1.56)	0.676	1.14 (0.72-1.80)	0.581
<b>Tiempo de residencia (años)</b>	1.24 (1.04-1.48)	0.016	1.21 (1.05-1.40)	0.008
<b>Experiencia previa con la tecnología del grupo</b>				
<b>Ninguna</b>	Referencia		Referencia	
<b>Poca (&lt; 10 veces)</b>	1.47 (0.84-2.56)	0.173	1.28 (0.81-2.00)	0.290
<b>Mucha (≥ 10 veces)</b>	1.70 (0.85-3.38)	0.134	1.47 (0.80-2.51)	0.233
<b>Tiempo utilizado (minutos)</b>	1.02 (1.01-1.04)	0.008	1.02 (1.00-1.03)	0.019

Los resultados estadísticamente significativos quedan resaltados en dorado (p<0.05).

Resultados dados como Razón de Probabilidades OR (Intervalo de Confianza al 95%)

<sup>a</sup> Los modelos provienen de un análisis de regresión logística de efectos mixtos con intersección aleatoria.

Tabla 6. Ajuste multivariante de Razón de Probabilidades u Odds Ratio para la correcta clasificación de las fracturas de húmero proximal por las clasificaciones de Neer y HGLS.

Al controlar por edad, sexo, nivel hospitalario y experiencia previa, no encontramos diferencias estadísticamente significativas en la clasificación correcta de las fracturas de húmero proximal tanto para HGLS-Hertel como para la clasificación de Neer comparando Realidad Virtual frente a Modelos impresos en 3D.

El tiempo de residencia mostró una relación directa con la precisión de la clasificación de fracturas para HGLS y Neer (OR = 1,24; intervalo de confianza (IC) del 95 %: 1,04-1,48 y OR = 1,21; IC del 95 %: 1,05-1,40, respectivamente). Esto implica una mejora de aproximadamente un 24% para la clasificación HGLS y un 21% para la clasificación Neer por año de residencia.

El tiempo dedicado a la prueba completa también mostró una relación directa estadísticamente significativa con la precisión de la clasificación tanto para HGLS como para Neer (OR = 1,02; IC del 95 %: 1,01-1,04 y OR = 1,02; IC del 95 %: 1,00-1,03, respectivamente). Por lo tanto, por cada minuto adicional dedicado al análisis de los 34 húmeros, se observó una mejora de la precisión de aproximadamente un 2 %.

#### **IV.4. Otros parámetros estudiados: aciertos en el tratamiento, satisfacción y utilidad**

Como ya se comentó a lo largo de apartados previos, la variable “tasa de acierto en el tratamiento” también fue estudiada, aunque de manera anecdótica, ya que consideramos que existen limitaciones severas causadas por el anonimato de los pacientes portadores de las fracturas de húmero proximal presentes en este trabajo. El no poder revelar ciertos datos sensibles sobre los mismos (edad, Barthel, sexo, ocupación, comorbilidades...), cruciales a la hora de elegir el tratamiento, hacen que este parámetro tenga poco valor per sé, y por ello no se ahondó en el análisis estadístico del mismo.

De forma anecdótica, cabe comentar que existió una tasa de acierto en el tratamiento del 51.69% para el grupo de figuras impresas en 3D frente a un 49.22% en el grupo de Realidad Virtual. No se ahondó en el análisis estadístico de estos datos por la escasa validez de los mismos. Esto se explicó en profundidad a los residentes, como se refleja en el apartado [III.5.4 Charla de instrucción previa al cuestionario](#).

Respecto a otras variables como el grado de satisfacción o de utilidad, estas variables constituyen futuras hipótesis de trabajo que serán publicadas en artículos futuros de este equipo investigador. En la [Figura 57](#) y [Figura 58](#) se exponen los resultados crudos obtenidos, en los cuales se aprecia respectivamente que existe una tendencia clara de aumento de utilidad-satisfacción y confianza percibidas tanto con el uso de modelos impresos en 3D como con modelos plasmados en realidad virtual respecto al uso de modelos convencionales (“neutro” en escalas de utilidad-satisfacción). En trabajos futuros se tratará de demostrar si estas diferencias son estadísticamente significativas y si, a su vez, existen diferencias entre ambas nuevas tecnologías en estos campos con los datos de los que se dispone. No se exponen estas conclusiones en la presente tesis para no restar originalidad a los mencionados trabajos futuros.

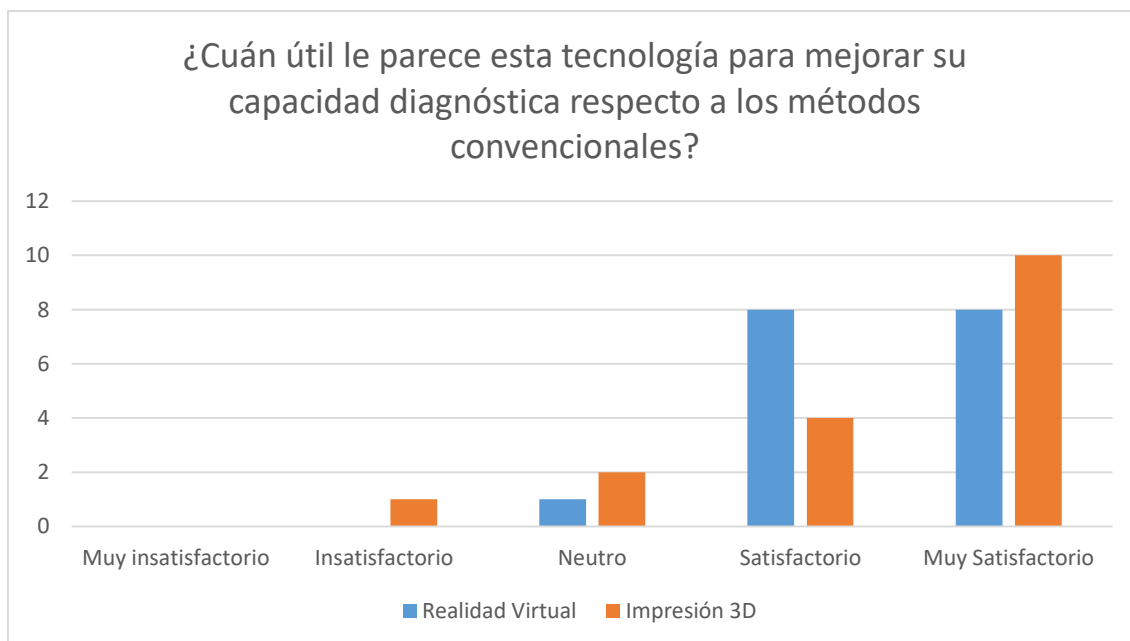
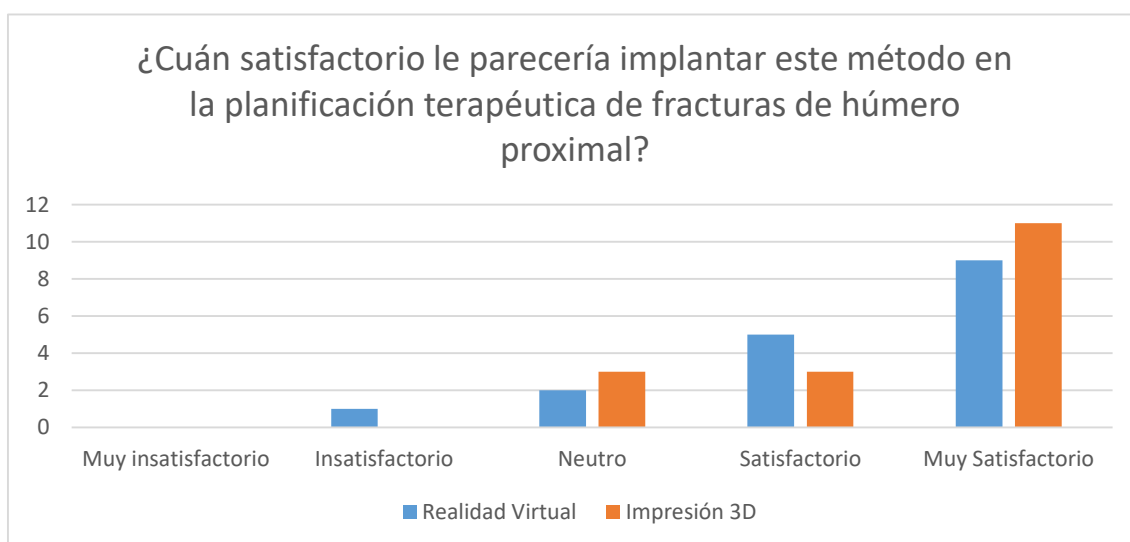
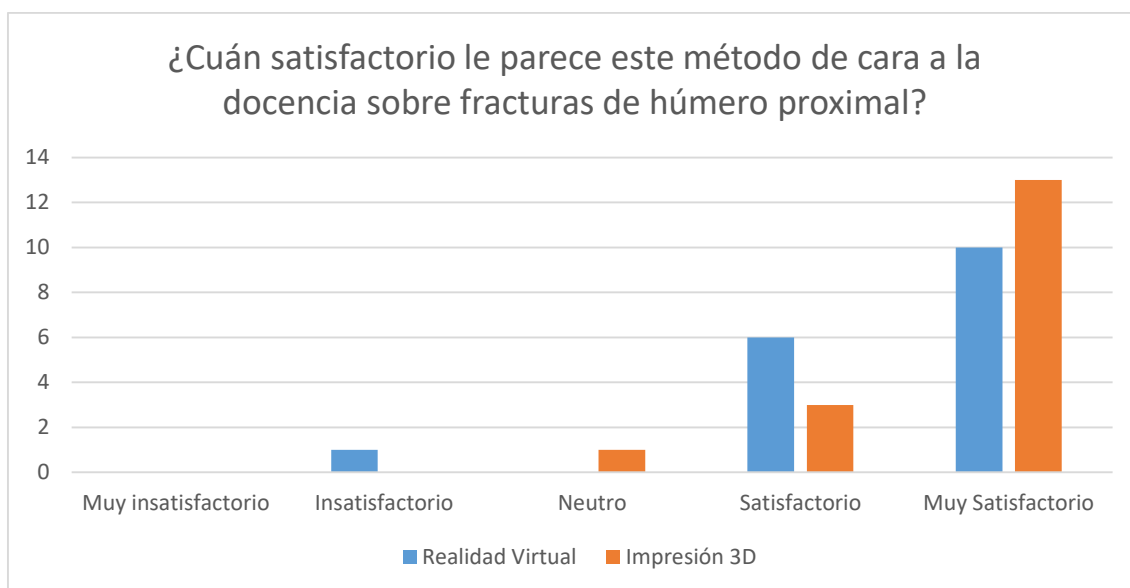


Figura 57: Gráficos de respuestas sobre utilidad-satisfacción. Neutro = Convencional

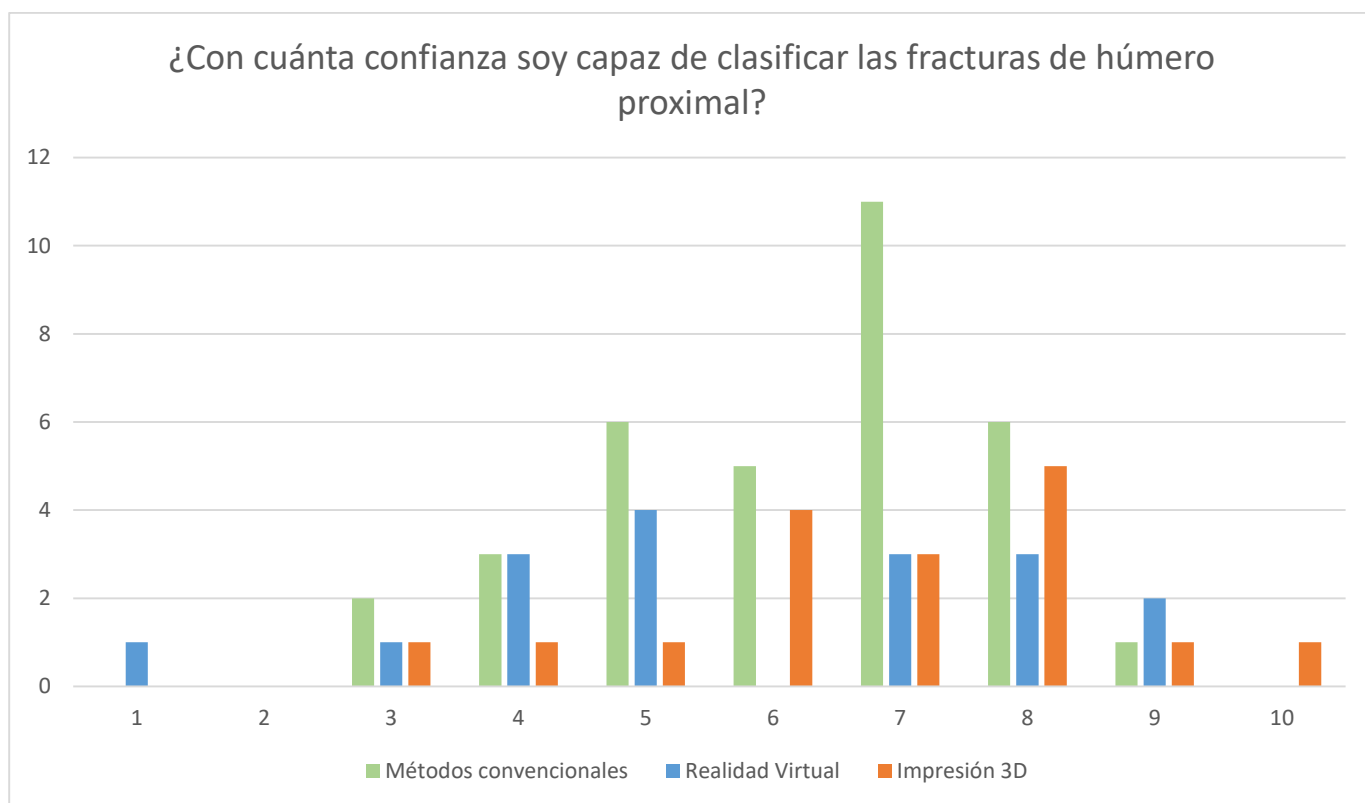


Figura 58. Gráfico de respuesta sobre grado de confianza al clasificar las fracturas de húmero proximal. Se puede apreciar una mayor dispersión de los datos al usar las nuevas tecnologías de manera general. Cabría correlacionar esta tendencia con el número de usos previos de dicha tecnología.

## V. Discusión

### V.1. Nuevas tecnologías en clasificaciones de húmero proximal

Las nuevas tecnologías que permiten el manejo de modelos tridimensionales para la planificación en cirugía ortopédica y traumatología, y más concretamente en el campo de las fracturas de húmero proximal que nos ocupa, se han vuelto de una importancia capital. A lo largo de los años se han propuesto diversos métodos asistidos por ordenador para la identificación de fragmentos humerales, basado en la obtención de imágenes, por ejemplo, a través de una TAC, y un posterior análisis comparativo de las reconstrucciones 3D del húmero fracturado con el contralateral del propio paciente [Fürnstahl et al., 2012], entre otros métodos.

Aunque el valor de estas tecnologías no está en duda, todavía nos encontramos en una fase precoz en el uso de las mismas en la cual aún es necesario identificar qué tecnologías podrían ser las más adecuadas para cada tipo de patología y usuarios concretos. Actualmente, la impresión de figuras en 3D y la realidad virtual son tecnologías en boga y de rápido desarrollo para interactuar con modelos 3D, y cuyo potencial está aún por explorar en el contexto de la clasificación de fracturas, al igual que en otros campos de la medicina y educación.

Tal y como venimos comentando a lo largo de la presente tesis, el uso de la impresión 3D se ha convertido hasta ahora en el método Gold Standard para el diagnóstico de fracturas de húmero proximal según distintos tipos de clasificación [Iordens et al., 2016; Bougher et al., 2020]. El uso de tecnologías de impresión 3D en la planificación preoperatoria ha mejorado los procesos y resultados de la cirugía de hombro, reduciendo el tiempo de operación, la exposición a la radiación, el dolor y mejorando los resultados del paciente al tiempo que mejora la curación anatómica y aumenta la movilidad posoperatoria [You et al., 2016; Li et al., 2022]. El uso de la impresión en 3D también ha sido probado y validado para la clasificación y el diagnóstico de fracturas en otras regiones del cuerpo [Lim et al., 2018; Goyal et al., 2022; Huitema et al., 2022; Yammine et al., 2022].

En este contexto actual, el autor de la presente tesis, en colaboración con otros profesionales multidisciplinares de ámbito nacional e internacional, publicó un estudio tipo ensayo controlado aleatorizado multicéntrico de no inferioridad para determinar si podría haber diferencias significativas entre el uso de modelos impresos en 3D y modelos plasmados en un entorno de realidad virtual para la clasificación y el diagnóstico de las fracturas de húmero proximal [Almirón Santa Bárbara et al., 2023]. En el mencionado estudio, observamos que no hubo diferencias estadísticamente significativas entre ambas tecnologías de cara a clasificar exitosamente las fracturas de húmero proximal, lo cual nos permitiría concluir que ambas tecnologías son probablemente equivalentes para este diseño. La precisión de la clasificación de fracturas observada fue del 51,8 % (VR) frente al 55,9 % (3DPM) para HGLS y del 64,9 % (VR) frente al 67,5 % (3DPM) para la clasificación de Neer, lo que resulta consonante con los resultados de concordancia entre observadores publicados previamente [Iordens et al., 2016].

En el mencionado trabajo, también se comparó directamente la precisión de clasificación de las fracturas de húmero proximal utilizando realidad virtual y modelos impresos en 3D, obteniéndose una razón de probabilidades ajustada por múltiples variantes para realidad virtual frente a modelos impresos en 3D de 1,14 (0,77-1,67) en la clasificación HGLS y 1,08 (0,79-1,48) en la clasificación Neer, ambos a favor de 3DPM, aunque sin significación estadística. Por lo tanto, según el estudio desarrollado por los autores mencionados, entre ellos el de la presente tesis, Se puede inferir que la realidad virtual debe considerarse como no-inferior a la impresión 3D (hasta ahora el Gold Standard) a la hora de clasificar fracturas de húmero proximal tanto por el sistema de Neer como por el de Hertel-HGLS. De este modo, podríamos considerar ambas tecnologías como equivalentes. Dicho esto, bajo nuestro punto de vista la realidad virtual presenta una serie de ventajas ya mencionadas a lo largo de la presente tesis y en las cuales Se volverá a incidir en el próximo apartado [V.2 Realidad Virtual frente a Impresión 3D](#), que la convierten en una probable mejor alternativa que la impresión 3D.

Hasta donde sabemos, el ya mencionado estudio es el primero que evalúa el uso de realidad virtual en la clasificación de fracturas de húmero proximal. Existe un precedente de una comparación de Realidad Aumentada (que no virtual) combinada con otros métodos para diagnosticar y clasificar fracturas de húmero proximal, incluyendo entre ellos el uso de modelos impresos en 3D. Dicho estudio mostró la mayor tasa de concordancia interobservador usando modelos impresos en 3D frente a otras tecnologías, afianzando la idea de que esta tecnología representaría el Gold Standard hasta ahora [Cocco et al., 2020].

También hay algunos trabajos que abogan por el uso de realidades virtual y aumentada por separado en cirugía traumatológica ortopédica, destacando específicamente la combinación de realidad aumentada con modelos impresos en 3D, aunque en este caso no existe una comparación empírica directa de las tecnologías [Negrillo-Cárdenas et al., 2020]. Algunos otros trabajos evalúan la utilidad de las tecnologías de realidad virtual para tareas quirúrgicas, demostrando que la realidad virtual puede ser una tecnología apropiada para la planificación quirúrgica y otros menesteres preoperatorios en diversos tipos de cirugía sobre hueso, por ejemplo, a nivel maxilofacial [Negrillo et al., 2020; Verhey et al., 2020; Zhang et al., 2021].

En el contexto actual, cada vez más estandarizado y exigente desde el punto de vista legal, la necesidad de obtener una serie de permisos y acreditaciones para el desarrollo de cualquier modelo personalizado que vaya a tomar parte en el proceso de toma de decisiones terapéuticas sobre un paciente es cada vez mayor. Algunos de estos permisos requeridos son la documentación técnica de los distintos "Medical Devices" utilizados (MD), la licencia de uso de los mismos o la garantía de sistema de calidad ISO 13485:2016. En algunos casos, se permitirá que el desarrollo de estos dispositivos manufacturados específicos de paciente sea desarrollado por empresas externas al centro sanitario, las cuales deben estar debidamente acreditadas para ello [Andrés-Cano et al., 2021]. De cara a utilizar dispositivos fabricados a medida mediante estas tecnologías, es recomendable disponer de los mencionados documentos.

Cabe mencionar que en el presente estudio no ha existido ningún tipo de conflicto respecto a este hecho, en tanto que, aunque era un estudio prospectivo con uso de biomodelos de pacientes específicos, el objetivo final del mismo no era aplicar procedimientos terapéuticos a dichos pacientes, dado que estos ya habían sido tratados en el pasado, y las decisiones tomadas por los distintos residentes no influirían de ningún modo en el seguimiento de los pacientes que cedieron las imágenes de sus húmeros proximales fracturados.

## **V.2. Realidad Virtual frente a Impresión en 3D**

Aunque el diseño de no inferioridad puede indicar resultados de tasa de acierto diagnóstico equivalentes entre el uso de figuras impresas en 3D y modelos proyectados en realidad virtual, obviamente existen otras diferencias y factores adicionales que deben ser consideradas a la hora de comparar estas tecnologías, una vez demostrada dicha no inferioridad.

Por ejemplo, el coste y el tiempo de para producir un modelo impreso en 3D ha disminuido considerablemente en los últimos años junto con una reducción en la experiencia requerida para preparar y producir modelos a partir de datos de escaneo 3D. Esta tendencia se ha debido principalmente al movimiento RepRap, comentado en el apartado [I.3.1 Antecedentes históricos \(de la impresión 3D\)](#). No obstante, es inevitable que la producción de un modelo impreso en 3D requiera una impresora 3D, a menudo un espacio fija para la misma (laboratorio) y un suministro regular de materiales. Esto puede significar que se debe dedicar un valioso espacio de oficina o equipo al proceso.

Quizá el desafío más notable para esta tecnología es el tiempo requerido para producir un modelo impreso en 3D de calidad suficiente. Para este estudio, dedicamos un promedio de aproximadamente siete horas a imprimir cada modelo. Es cierto que se pueden imprimir los modelos en grupos, pero el tiempo de impresión normalmente será equivalente al de la suma de los tiempos de impresión de los modelos uno a uno, ahorrando solamente el tiempo de preparación de la impresora que es prácticamente insignificante (5-10 minutos por modelo), añadiendo un elevado riesgo de fracaso de la impresión. Cabe destacar que estas tasas de error son cada vez menores gracias a los nuevos componentes de las impresoras (railes, correas de alta calidad, ventiladores...) y al mejor conocimiento de esta tecnología.

Por último, los modelos impresos en 3D son generalmente producidos mediante plásticos de un solo uso que pueden tener impactos climáticos negativos, aunque el desarrollo de los nuevos tipos de bioplásticos, maderas y resinas biológicas pueden reducir este impacto medioambiental.

La realidad virtual no requiere ese paso a producción física que lleva de manera inherente a sí las desventajas mencionadas, lo cual implica una reducción notable en el tiempo de producción del modelo en comparación con los impresos en 3D, pasando estos tiempos de horas y horas de impresión a unos escasos minutos de transferencia al soporte de realidad virtual. Además, con esta tecnología no se requiere espacio adicional (laboratorio).

Los dispositivos de realidad virtual modernos son muy intuitivos y fáciles de configurar, vendiéndose como kits comerciales completos que, poniendo como ejemplo las Oculus Quest 2, sólo necesitan de una cuenta de Facebook y una red Wi-Fi para comenzar a funcionar. El escenario de realidad virtual utilizado para la prueba fue de diseño relativamente sencillo y sería aprovechable para cualquier futuro experimento o decisión terapéutica.

Una ventaja adicional de la realidad virtual es que se puede usar para evaluaciones instantáneas de múltiples sitios y múltiples usuarios en el metaverso, lo que hace que las consultas remotas sean más sólidas y reduce los impactos ecológicos de viajar para organizar reuniones o enviar el modelo a otro hospital. Otro aspecto ecológico a tener en cuenta sería la reducción del uso de plásticos.

Es precisamente por todas estas ventajas mencionadas por lo que diseñamos este estudio como uno de no inferioridad. En nuestro estudio, también observamos un tiempo más corto para las clasificaciones de PHF usando VR en comparación con 3DPM, aunque esta diferencia no fue estadísticamente significativa.

Si bien hay muchas promesas en torno a la realidad virtual, aún es una disciplina que está por pulir. En la [Tabla 7](#) se recogen de manera resumida algunas ventajas y desventajas ya mencionadas de cada una de las dos tecnologías que estamos comparando en esta tesis.

	Realidad Virtual	Impresión 3D
<b>Ventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>No inferior al Gold Standard</u></li> <li>• Consumo de recursos nulo</li> <li>• Simultaneidad del metaverso</li> <li>• <u>Más rápido a la hora de clasificar</u></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hasta la fecha el Gold Standard</li> <li>• Permite realizar cirugía sobre fantoma</li> <li>• Permite crear guías quirúrgicas</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intuitivas y fáciles de usar</li> <li>• Permiten tener una buena idea espacial de la anatomía</li> <li>• Atractivas de cara a la docencia y la planificación entre traumatólogos</li> </ul>	
<b>Desventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausencia de tacto</li> <li>• Necesidad de entorno gráfico</li> <li>• Problemas con software</li> <li>• Posibles mareos, cefaleas...</li> <li>• No hay protocolos estándar aún</li> <li>• Molesto con ciertas gafas de ver</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sobrecoste de impresora y materiales</li> <li>• Gasto eléctrico</li> <li>• Necesidad de espacio físico</li> <li>• Tiempo de impresión</li> <li>• Emisión de gases con algún material</li> <li>• Tasa de fallos asociada</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Precisa de una formación especializada</li> <li>• Las reconstrucciones de húmeros requieren de tiempo</li> <li>• Es necesario adquirir tecnologías, a ser posible certificadas</li> <li>• Es necesario realizar un TAC (implica radiación)</li> <li>• Requieren de certificaciones de cara a planificación quirúrgica</li> </ul>	

Tabla 7. Ventajas y desventajas de la Realidad Virtual y la Impresión 3D. En subrayado se ven algunas de las conclusiones extraídas en este trabajo.

### V.3. Expectativas de futuro

En contraposición con los resultados arrojados en nuestro trabajo que ponen en valor la utilidad de estas nuevas tecnologías en la clasificación de fracturas de húmero proximal, Spek y colaboradores (2022) informaron de que el uso de modelos impresos en 3D no mejoró la tasa de concordancia interobservador a la hora de identificar las características y patrones de fractura [Spek et al., 2022]. Si bien este hecho puede resultar importante, este documento debe analizarse cautelosamente, tanto por el pequeño tamaño muestral como porque no se tuvo en cuenta la posibilidad de un sesgo de anclaje debido a la combinación de imágenes en pantalla simultáneamente a la exposición de los modelos impresos en 3D. Por lo tanto, no está claro si los modelos impresos en 3D no mejoraban la tasa de concordancia bien porque no suponía un plus en el proceso de clasificación per sé o bien porque los participantes se basaron principalmente en medios más familiares como es el TAC a la hora de realizar la clasificación, ignorando los modelos impresos en 3D por ser una tecnología menos reconocible por los encuestados. Este es el único trabajo encontrado en la bibliografía que pone en duda la utilidad de los modelos impresos en 3D para clasificar las fracturas de húmero proximal y, como comentamos, bajo nuestro punto de vista presenta dos puntos débiles que deben ser tenidos en consideración a la hora de analizar el artículo y extraer conclusiones.

Sin embargo, el resto de la bibliografía expuesta durante esta tesis apoya firmemente el uso de la impresión en 3D para este menester, y todos los autores concluyen que esta línea de investigación debe continuar siendo explorada.

En nuestro estudio, la realidad virtual se mostró como un posible competidor de la impresión 3D, obteniendo resultados de no inferioridad al compararlas entre sí. Con ello, consideramos que sería interesante ver cómo la integración de la realidad virtual en el conjunto de herramientas de diagnóstico disponibles hoy en día afectaría a la tasa de acierto y concordancia interobservador al analizar este tipo de fractura. Consideramos de particular interés la posibilidad de interacción multiusuario y multisitio instantáneas a través del metaverso y la realidad virtual. Por todo ello, los autores del trabajo pensamos que sería necesario realizar nuevos estudios en esta línea, no sólo comparando las distintas tecnologías entre sí, sino entremezclando la realidad virtual con otras técnicas usadas en el estudio preoperatorio convencional actual (radiografías, TAC...).

La realidad virtual es ampliamente aceptada como una tecnología útil para el aprendizaje durante la residencia médica y, a menudo, es más eficaz otro tipo de modelos de entrenamiento [Verhey et al., 2020]. Sin embargo, hay escasa evidencia que respalde por ahora la utilidad de esta tecnología para clasificar y filiar fracturas. Esto se debe, en parte, a que la realidad virtual se ha enfocado, dentro del campo de la cirugía ortopédica y traumatología, a menesteres más orientados hacia la rehabilitación y/o el entrenamiento de técnicas quirúrgicas [Hasan et al., 2021; Berton et al., 2021; Matamala-Gómez et al., 2022].

Cuando este tipo de tecnología se utiliza para la planificación previa quirúrgica de fracturas de hombro (no para el diagnóstico), la realidad virtual ha demostrado mejores resultados que los métodos de entrenamiento convencionales en lo que a variables quirúrgicas se refiere y un tiempo de preparación quirúrgica menor que el necesario con los modelos impresos en 3D [Chen et al., 2018]. La evidencia actual sugiere que la inclusión de métodos de realidad virtual en una etapa más temprana del proceso de planificación puede agilizar aún más dicho procedimiento. Consideramos necesario seguir investigando en esta línea.

Una idea potencialmente útil del trabajo actual es que parecía haber una correlación significativa directamente proporcional y, por otra parte, poco sorprendente entre el tiempo de residencia y los resultados de la clasificación. Además, sucede lo mismo con la experiencia previa con el uso de la tecnología correspondiente. Por ello, consideramos que los futuros trabajos destinados a investigar este tipo de intervenciones tecnológicas deberán tener en consideración el tiempo de formación y/o años de experiencia, además de la experiencia de los participantes.

Aunque el tamaño de la muestra utilizada en la presente tesis es bastante grande para este tipo de estudio, especialmente dada la dificultad de acceder a una población concentrada de especialistas y residentes de cirugía ortopédica, la amplitud del intervalo de confianza en las clasificaciones de Neer y HGLS sugiere que futuros trabajos deberían considerar una muestra aún más grande.

## VI. Conclusiones

1. Las nuevas tecnologías se encuentran cada vez más presentes en todos los medios y disciplinas, incluyendo la medicina. Dentro de la Cirugía Ortopédica y Traumatología, estas nuevas tecnologías tienen cabida en múltiples facetas, desde la docencia hasta la creación de modelos específicos que favorezcan el tratamiento del paciente, entre otras aplicaciones.
2. La tecnología de impresión en 3D ha sido ampliamente investigada en el campo de la Cirugía Ortopédica y Traumatología, siendo actualmente una herramienta validada y afianzada dentro del flujo de trabajo de los equipos de esta especialidad.
3. Respecto a las fracturas de húmero proximal, la correcta clasificación preoperatoria de las mismas no es sencilla. Existen múltiples clasificaciones y métodos para clasificarlas correctamente, siendo ello crucial de cara a la toma de decisiones quirúrgicas y a la elección del tipo de tratamiento. Esto tiene una gran repercusión desde el punto de vista de la costo-efectividad.
4. Dentro de las formas de clasificar las fracturas de húmero proximal en la actualidad, probablemente las dos clasificaciones más extendidas son la de Neer y la HGLS de Hertel. Hasta la fecha, se podía considerar como recurso Gold Standard para este cometido de clasificación los modelos impresos en 3D.
5. Hasta la fecha no existían estudios que valoraran la utilidad de la realidad virtual a la hora de clasificar este tipo de fracturas. En el estudio que da sostén a esta tesis, demostramos que esta tecnología puede ser no inferior al ya mencionado Gold Standard.
6. Ambas tecnologías presentan ventajas y desventajas inherentes a las mismas, de modo que los autores del presente trabajo consideramos que podrían ser complementarias entre sí y mejorar, de forma conjunta, la planificación quirúrgica.
7. Es necesario realizar nuevos estudios en esta línea novedosa que permitan no solo hallar nuevas aplicaciones de estas tecnologías en este campo concreto sino, en general, en todo tipo de planificación quirúrgica en Cirugía Ortopédica y Traumatología.



---

## VII. Bibliografía

1. Abdel Khalik H, Humphries B, Zoratti M, Axelrod D, Kruse C, Ristevski B, Rajaratnam K, Gardner M, Tarride J-É, Johal H (2022) Reverse Total Shoulder Arthroplasty Is the Most Cost-effective Treatment Strategy for Proximal Humerus Fractures in Older Adults: A Cost-utility Analysis. *Clinical orthopaedics and related research United States* 480:2013–2026
2. Aimar A, Palermo A, Innocenti B (2019) The Role of 3D Printing in Medical Applications: A State of the Art. *Journal of healthcare engineering England* 2019:5340616
3. Aldawood FK (2023) A Comprehensive Review of 4D Printing: State of the Arts, Opportunities, and Challenges. *Actuators* 12
4. Almirón Santa-Bárbara R, García Rivera F, Lamb M, Víquez Da-Silva R, Gutiérrez Bedmar M (2023) New technologies for the classification of proximal humeral fractures: Comparison between Virtual Reality and 3D printed models—a randomised controlled trial. *Virtual Reality* 1–12
5. Anakwenze OA, Zoller S, Ahmad CS, Levine WN (2014) Reverse shoulder arthroplasty for acute proximal humerus fractures: a systematic review. *Journal of shoulder and elbow surgery United States* 23:e73-80
6. Andrés-Cano P, Calvo-Haro JA, Fillat-Gomà F, Andrés-Cano I, Perez-Mañanes R (2021) Role of the orthopaedic surgeon in 3D printing: current applications and legal issues for a personalized medicine. *Revista Española de Cirugía Ortopédica y Traumatología (English Edition)* 65:138–151
7. Bahrs C, Rolaufts B, Dietz K, Eingartner C, Weise K (2010) Clinical and radiological evaluation of minimally displaced proximal humeral fractures. *Archives of orthopaedic and trauma surgery Germany* 130:673–679
8. Bahrs C, Rolaufts B, Südkamp NP, Schmal H, Eingartner C, Dietz K, Pereira PL, Weise K, Lingenfelter E, Helwig P (2009) Indications for computed tomography (CT-) diagnostics in proximal humeral fractures: a comparative study of plain radiography and computed tomography. *BMC musculoskeletal disorders England* 10:33
9. Baker HP, Gutbrod J, Strelzow JA, Maassen NH, Shi L (2022) Management of Proximal Humerus Fractures in Adults-A Scoping Review. *Journal of clinical medicine Switzerland* 11

10. Beks RB, Ochen Y, Frima H, Smeeing DPJ, van der Meijden O, Timmers TK, van der Velde D, van Heijl M, Leenen LPH, Groenwold RHH, Houwert RM (2018) Operative versus nonoperative treatment of proximal humeral fractures: a systematic review, meta-analysis, and comparison of observational studies and randomized controlled trials. *Journal of shoulder and elbow surgery United States* 27:1526–1534
11. Benetos IS, Karampinas PK, Mavrogenis AF, Romoudis P, Pneumáticos SG, Vlamis J (2012) External fixation for displaced 2-part proximal humeral fractures. *Orthopedics United States* 35:e1732-7
12. Berkes MB, Little MTM, Lazaro LE, Cymerman RM, Pardee NC, Helfet DL, Dines JS, Lorich DG (2014) Intramedullary allograft fibula as a reduction and fixation tool for treatment of complex proximal humerus fractures with diaphyseal extension. *Journal of orthopaedic trauma United States* 28:e56-64
13. Berkman MI (2018) History of Virtual Reality BT - Encyclopedia of Computer Graphics and Games. In Lee N (ed) Springer International Publishing, Cham, pp 1–9
14. Berton A, Longo UG, Candela V, Fioravanti S, Giannone L, Arcangeli V, Alciati V, Berton C, Facchinetti G, Marchetti A, Schena E, De Marinis MG, Denaro V (2020) Virtual Reality, Augmented Reality, Gamification, and Telerehabilitation: Psychological Impact on Orthopedic Patients' Rehabilitation. *Journal of clinical medicine* 9
15. Bhayana H, Chouhan DK, Aggarwal S, Prakash M, Patel S, Arora C, Dhillon MS (2022) Outcomes of plate osteosynthesis for displaced 3-part and 4-part proximal humerus fractures with deltopectoral vs. deltoid split approach. *European journal of trauma and emergency surgery : official publication of the European Trauma Society Germany* 48:4559–4567
16. Bidgood D, Horii S (1992) Introduction to the ACR-NEMA DICOM standard. *Radiographics : a review publication of the Radiological Society of North America, Inc* 12:345–355
17. Bjørndal J, Fraser AN, Wagle TM, Kleven L, Lien OA, Eilertsen L, Mader K, Apold H, Larsen LB, Madsen J-E, Fjalestad T (2022) A cost-effectiveness analysis of reverse total shoulder arthroplasty compared with locking plates in the management of displaced proximal humerus fractures in the elderly: the DelPhi trial. *Journal of shoulder and elbow surgery United States* 31:2187–2195
18. Blomstedt P (2014) Orthopedic surgery in ancient Egypt. *Acta orthopaedica Sweden* 85:670–676

19. Boileau P, Morin-Salvo N, Bessière C, Chelli M, Gauci M-O, Lemmex DB (2020) Bony increased-offset-reverse shoulder arthroplasty: 5 to 10 years' follow-up. *Journal of shoulder and elbow surgery United States* 29:2111–2122
20. Bougher H, Nagendiram A, Banks J, Hall LM, Heal C (2020) Imaging to improve agreement for proximal humeral fracture classification in adult patient: A systematic review of quantitative studies. *Journal of clinical orthopaedics and trauma India* 11:S16–S24
21. Bruinsma WE, Guitton TG, Warner JJP, Ring D (2013) Interobserver reliability of classification and characterization of proximal humeral fractures: a comparison of two and three-dimensional CT. *The Journal of bone and joint surgery American volume United States* 95:1600–1604
22. Bu G, Sun W, Li J, Yang T, Li M, Wei W (2021) MuliLoc Nail Versus Philos Plate in Treating Proximal Humeral Fractures: A Retrospective Study Among the Elderly. *Geriatric orthopaedic surgery & rehabilitation United States* 12:21514593211043960
23. Burgmeier R, Bolia IK, Gipsman A, Jalali O, Weber AE (2021) Plate fixation versus intramedullary nailing of proximal humerus fractures: an ACS NSQIP-based comparative analysis over 8 years. *European journal of orthopaedic surgery & traumatology : orthopedie traumatologie France* 31:33–41
24. Burkhart SS, Esch JC, Jolson RS (1993) The rotator crescent and rotator cable: an anatomic description of the shoulder's "suspension bridge". *Arthroscopy : the journal of arthroscopic & related surgery : official publication of the Arthroscopy Association of North America and the International Arthroscopy Association United States* 9:611–616
25. Campochiaro G, Rebuzzi M, Baudi P, Catani F (2015) Complex proximal humerus fractures: Hertel's criteria reliability to predict head necrosis. *Musculoskeletal surgery Italy* 99 Suppl 1:S9-15
26. Carofino BC, Leopold SS (2013) Classifications in brief: the Neer classification for proximal humerus fractures. *Clinical orthopaedics and related research* 471:39–43
27. Chandrappa MH, Hajibandeh S, Hajibandeh S (2017) Postoperative outcomes of initial varus versus initial valgus proximal humerus fracture: A systematic review and meta-analysis. *Journal of clinical orthopaedics and trauma India* 8:14–20
28. Chelli M, Gasbarro G, Lavoué V, Gauci M-O, Raynier J-L, Trojani C, Boileau P (2022) The reliability of the Neer classification for proximal humerus fractures: a survey of orthopedic shoulder surgeons. *JSES international United States* 6:331–337

29. Chen Y, Jia X, Qiang M, Zhang K, Chen S (2018) Computer-Assisted Virtual Surgical Technology Versus Three-Dimensional Printing Technology in Preoperative Planning for Displaced Three and Four-Part Fractures of the Proximal End of the Humerus. *The Journal of bone and joint surgery American volume United States* 100:1960–1968
30. Cipresso P, Giglioli IAC, Raya MA, Riva G (2018) The Past, Present, and Future of Virtual and Augmented Reality Research: A Network and Cluster Analysis of the Literature. *Frontiers in psychology Switzerland* 9:2086
31. Clavert P, Adam P, Bevort A, Bonnomet F, Kempf J-F (2010) Pitfalls and complications with locking plate for proximal humerus fracture. *Journal of shoulder and elbow surgery United States* 19:489–494
32. Cocco LF, Aihara AY, Franciozi C, dos Reis FB, Luzo MVM (2020) Three-dimensional models increase the interobserver agreement for the treatment of proximal humerus fractures. *Patient Safety in Surgery* 14:33
33. Cocco L, Aihara A, Lopes FPP, Heron W, Franciozi C, Reis F, Luzo M (2022) Three-dimensional printing models increase inter-rater agreement for classification and treatment of proximal humerus fractures. *Patient Safety in Surgery* 16
34. Codman E (1934) *The Shoulder Rupture of the Supraspinatus Tendon and other lesions in or about the subacromial bursa*. Todd T (ed) Thomas Todd, Boston
35. Collotte P, Gauci M-O, Vieira TD, Walch G (2022) Bony increased-offset reverse total shoulder arthroplasty (BIO-RSA) associated with an eccentric glenosphere and an onlay 135° humeral component: clinical and radiological outcomes at a minimum 2-year follow-up. *JSES international United States* 6:434–441
36. Condino S, Turini G, Parchi PD, Vigliani RM, Piolanti N, Gesi M, Ferrari M, Ferrari V (2018) How to Build a Patient-Specific Hybrid Simulator for Orthopaedic Open Surgery: Benefits and Limits of Mixed-Reality Using the Microsoft HoloLens. *Journal of healthcare engineering England* 2018:5435097
37. Corbacho B, Duarte A, Keding A, Handoll H, Chuang LH, Torgerson D, Brealey S, Jefferson L, Hewitt C, Rangan A (2016) Cost effectiveness of surgical versus non-surgical treatment of adults with displaced fractures of the proximal humerus: economic evaluation alongside the PROFHER trial. *The bone & joint journal England* 98-B:152–159
38. Couch BK, Maher PL, Fourman MS, Moloney GB, Siska PA, Tarkin IS (2021) Increased Medial Displacement of the Humeral Shaft of at Least 40% Correlates With an Increased Incidence of Nerve Injury in Proximal Humerus Fractures. *The Iowa orthopaedic journal United States* 41:163–166

39. Cruess RL (1978) Experience with steroid-induced avascular necrosis of the shoulder and etiologic considerations regarding osteonecrosis of the hip. *Clinical orthopaedics and related research United States* 86–93
40. Dauwe J, Walters G, Holzer LA, Vanhaecht K, Nijs S (2020) Failure after proximal humeral fracture osteosynthesis: a one year analysis of hospital-related healthcare cost. *International orthopaedics Germany* 44:1217–1221
41. Day M, Levine W (2016) Shoulder Lateral (Deltoid Splitting) Approach. *Orthobullets*
42. Dillon MT, Prentice HA, Burfeind WE, Chan PH, Navarro RA (2019) The increasing role of reverse total shoulder arthroplasty in the treatment of proximal humerus fractures. *Injury Netherlands* 50:676–680
43. Eberl M (2016) Fisher-Yates shuffle. *Arch Formal Proofs* 2016
44. Edelson G, Kelly I, Vigder F, Reis ND (2004) A three-dimensional classification for fractures of the proximal humerus. *The Journal of bone and joint surgery British volume England* 86:413–425
45. Ejnisman L, Gobbato B, de França Camargo AF, Zancul E (2021) Three-Dimensional Printing in Orthopedics: from the Basics to Surgical Applications. *Current reviews in musculoskeletal medicine* 14:1–8
46. Familiari F, Rojas J, Nedim Doral M, Huri G, McFarland EG (2018) Reverse total shoulder arthroplasty. *EFORT open reviews England* 3:58–69
47. Fan W, Cui X, Shi L, Xie T, Rui Y, Chen H (2022) [Comparison of locking plate and intramedullary nail in treatment of Neer two- and three-part fractures of the proximal humerus in the elderly]. *Zhongguo xiu fu chong jian wai ke za zhi = Zhongguo xiufu chongjian waike zazhi = Chinese journal of reparative and reconstructive surgery China* 36:274–278
48. Fankhauser F, Boldin C, Schippinger G, Haunschmid C, Szyszkowitz R (2005) A new locking plate for unstable fractures of the proximal humerus. *Clinical orthopaedics and related research United States* 176–181
49. Fidanza A, Perinetti T, Logroscino G, Saracco M (2022) 3D Printing Applications in Orthopaedic Surgery: Clinical Experience and Opportunities. *Applied Sciences* 12
50. Fink Barnes L, Parsons BO, Flatow EL (2015) Percutaneous Fixation of Proximal Humeral Fractures. *JBJS essential surgical techniques United States* 5:e10

51. Fjalestad T, Hole MØ, Jørgensen JJ, Strømsøe K, Kristiansen IS (2010) Health and cost consequences of surgical versus conservative treatment for a comminuted proximal humeral fracture in elderly patients. *Injury Netherlands* 41:599–605
52. Foroohar A, Tosti R, Richmond JM, Gaughan JP, Ilyas AM (2011) Classification and treatment of proximal humerus fractures: inter-observer reliability and agreement across imaging modalities and experience. *Journal of orthopaedic surgery and research England* 6:38
53. Foruria AM, Martinez-Catalan N, Pardos B, Larson D, Barlow J, Sanchez-Sotelo J (2022) Classification of proximal humerus fractures according to pattern recognition is associated with high intraobserver and interobserver agreement. *JSES international United States* 6:563–568
54. Fuchs B, Weishaupt D, Zanetti M, Hodler J, Gerber C (1999) Fatty degeneration of the muscles of the rotator cuff: assessment by computed tomography versus magnetic resonance imaging. *Journal of shoulder and elbow surgery United States* 8:599–605
55. Fürnstahl P, Székely G, Gerber C, Hodler J, Snedeker JG, Harders M (2012) Computer assisted reconstruction of complex proximal humerus fractures for preoperative planning. *Medical image analysis Netherlands* 16:704–720
56. Gadea F, Bouju Y, Berhouet J, Bacle G, Favard L (2015) Deltopectoral approach for shoulder arthroplasty: anatomic basis. *International orthopaedics Germany* 39:215–225
57. Gavaskar AS, Pattabiraman K, Srinivasan P, Raj R V, Jayakumar B, Rangasamy NK (2022) What Factors Are Associated With Poor Shoulder Function and Serious Complications After Internal Fixation of Three-part and Four-part Proximal Humerus Fracture-dislocations? *Clinical orthopaedics and related research United States* 480:1566–1573
58. Gnudi S, Sitta E, Lisi L (2009) Relationship of body mass index with main limb fragility fractures in postmenopausal women. *Journal of bone and mineral metabolism Japan* 27:479–484
59. Goetti P, Denard PJ, Collin P, Ibrahim M, Mazzolari A, Lädermann A (2021) Biomechanics of anatomic and reverse shoulder arthroplasty. *EFORT open reviews England* 6:918–931
60. Goutallier D, Postel JM, Bernageau J, Lavau L, Voisin MC (1994) Fatty muscle degeneration in cuff ruptures. Pre- and postoperative evaluation by CT scan. *Clinical orthopaedics and related research United States* 78–83

61. Goyal S, Chua CXK, Chen YS, Murphy D, O'Neill GK (2022) Utility of 3D printed models as adjunct in acetabular fracture teaching for Orthopaedic trainees. *BMC Medical Education* 22:595
62. Gracitelli MEC, Malavolta EA, Assunção JH, Kojima KE, dos Reis PR, Silva JS, Ferreira Neto AA, Hernandez AJ (2016) Locking intramedullary nails compared with locking plates for two- and three-part proximal humeral surgical neck fractures: a randomized controlled trial. *Journal of shoulder and elbow surgery United States* 25:695–703
63. Grammont P, Trouilloud P, Laffay J, Deries X (1987) Concept study and realization of a new total shoulder prosthesis. *Rhumatologie* 39:407–418
64. Gunst S, Walch G, Nové-Josserand L (2018) Percutaneous fixation of valgus displaced fracture of the proximal humerus using a single screw. *Orthopaedics & traumatology, surgery & research : OTSR France* 104:67–70
65. Guyatt GH, Townsend M, Berman LB, Keller JL (1987) A comparison of Likert and visual analogue scales for measuring change in function. *Journal of Chronic Diseases* 40:1129–1133
66. Hall S (2017) *Basic Biomechanics*. Hill M (ed) MacGraw Hill
67. Handoll HH, Elliott J, Thillemann TM, Aluko P, Brorson S (2022) Interventions for treating proximal humeral fractures in adults. *The Cochrane database of systematic reviews England* 6:CD000434
68. Handoll H, Brealey S, Rangan A, Keding A, Corbacho B, Jefferson L, Chuang L-H, Goodchild L, Hewitt C, Torgerson D (2015) The ProFHER (PROximal Fracture of the Humerus: Evaluation by Randomisation) trial - a pragmatic multicentre randomised controlled trial evaluating the clinical effectiveness and cost-effectiveness of surgical compared with non-surgical treatment for proximal fracture of the humerus in adults. *Health technology assessment (Winchester, England) England* 19:1–280
69. Hao TD, Huat AWT (2017) Surgical technique and early outcomes of intramedullary nailing of displaced proximal humeral fractures in an Asian population using a contemporary straight nail design. *Journal of orthopaedic surgery (Hong Kong) England* 25:2309499017713934
70. Harbrecht A, Hackl M, Leschinger T, Müller LP, Wegmann K (2022) Focus on stability: biomechanical evaluation of external fixation technique versus locking plate osteosynthesis in 3-part proximal humeral fractures. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery* 31:1666–1673

71. Harmer LS, Crickard C V, Phelps KD, McKnight RR, Sample KM, Andrews EB, Hamid N, Hsu JR (2018) Surgical Approaches to the Proximal Humerus: A Quantitative Comparison of the Deltopectoral Approach and the Anterolateral Acromial Approach. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons Global research & reviews United States* 2:e017
72. Hasan LK, Haratian A, Kim M, Bolia IK, Weber AE, Petrigliano FA (2021) Virtual Reality in Orthopedic Surgery Training. *Advances in medical education and practice* 12:1295–1301
73. Hertel R, Hempfing A, Stiehler M, Leunig M (2004) Predictors of humeral head ischemia after intracapsular fracture of the proximal humerus. *Journal of shoulder and elbow surgery United States* 13:427–433
74. Hessmann MH, Nijs S, Mittlmeier T, Kloub M, Segers MJM, Winkelbach V, Blauth M (2012) Internal fixation of fractures of the proximal humerus with the MultiLoc nail. *Operative Orthopadie und Traumatologie Germany* 24:418–431
75. Hodgson S (2006) Proximal humerus fracture rehabilitation. *Clinical orthopaedics and related research United States* 442:131–138
76. Hooper J, Tsiridis E, Feng JE, Schwarzkopf R, Waren D, Long WJ, Poultsides L, Macaulay W (2019) Virtual Reality Simulation Facilitates Resident Training in Total Hip Arthroplasty: A Randomized Controlled Trial. *The Journal of arthroplasty United States* 34:2278–2283
77. Hoppenfeld S, De Boer P, Buckley R (2021) *Surgical exposures in orthopaedics : the anatomic approach*. Wolters Kluwer/Lippincott Williams & Wilkins Health, Philadelphia
78. Horvath J (2014) A Brief History of 3D Printing. *Mastering 3D Printing*, pp 3–10
79. Hosmer DW, Lemeshow S, Sturdivant RX (2013) *Applied Logistic Regression*. Wiley
80. Hsu JE (2019) External Fixation of Proximal Humeral Fractures: Does It Deserve More Visibility?: Commentary on an article by Davide Blonna, MD, et al.: “Outcomes of 188 Proximal Humeral Fractures Treated with a Dedicated External Fixator with Follow-up Ranging from 2 to 12 Years.” *JBJS* 101
81. Huitema JM, van der Gaast N, Brouwers L, Jaarsma RL, Doornberg JN, Edwards MJR, Hermans E (2022) Are 3D-printed Models of Tibial Plateau Fractures a Useful Addition to Understanding Fractures for Junior Surgeons? *Clinical Orthopaedics and Related Research* 480

82. Hutchinson PH, Bae DS, Waters PM (2011) Intramedullary nailing versus percutaneous pin fixation of pediatric proximal humerus fractures: a comparison of complications and early radiographic results. *Journal of pediatric orthopedics United States* 31:617–622
83. Huttunen TT, Launonen AP, Pihlajamäki H, Kannus P, Mattila VM (2012) Trends in the surgical treatment of proximal humeral fractures - a nationwide 23-year study in Finland. *BMC musculoskeletal disorders England* 13:261
84. Iordens GIT, Mahabier KC, Buisman FE, Schep NWL, Muradin GSR, Beenen LFM, Patka P, Van Lieshout EMM, Den Hartog D (2016) The reliability and reproducibility of the Hertel classification for comminuted proximal humeral fractures compared with the Neer classification. *Journal of orthopaedic science : official journal of the Japanese Orthopaedic Association Japan* 21:596–602
85. Jabran A, Peach C, Ren L (2018) Biomechanical analysis of plate systems for proximal humerus fractures: a systematic literature review. *Biomedical engineering online England* 17:47
86. Jaime Arriagada S (2021) “EL ÁRBOL DE ANDRY.” *Revista Médica Clínica Las Condes* 32:364
87. Jain NB, Kuye I, Higgins LD, Warner JJP (2013) Surgeon volume is associated with cost and variation in surgical treatment of proximal humeral fractures. *Clinical orthopaedics and related research United States* 471:655–664
88. Jang Y, Kim D (2021) Biomechanical study of Proximal humeral fracture fixation: Locking plate with medial support screw vs. locking plate with intramedullary fibular graft. *Clinical biomechanics (Bristol, Avon) England* 90:105510
89. Jayarajah U, Amarasooriya M, Sooriyachchi R (2021) Multifragmentary proximal humerus fracture successfully treated with k-wire fixation: A case report. *International journal of surgery case reports Netherlands* 87:106415
90. Jin X, Duan X, Jin H, Ma Y (2020) A Novel Hybrid Secure Image Encryption Based on the Shuffle Algorithm and the Hidden Attractor Chaos System. *Entropy* 22
91. Jobin CM, Galdi B, Anakwenze OA, Ahmad CS, Levine WN (2015) Reverse shoulder arthroplasty for the management of proximal humerus fractures. *The Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons United States* 23:190–201
92. Johnson NA, Pandey R (2019) Proximal humerus fracture-dislocation managed by mini-open reduction and percutaneous screw fixation. *Shoulder & elbow United States* 11:353–358

- 
93. Kadi R, Milants A, Shahabpour M (2017, December) Shoulder Anatomy and Normal Variants. *Journal of the Belgian Society of Radiology England*
  94. Kancherla VK, Singh A, Anakwenze OA (2017) Management of Acute Proximal Humeral Fractures. *The Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons United States* 25:42–52
  95. Kapandji A. (2012) *Fisiología articular Tomo 1: hombro, codo, pronosupinación, muñeca,mano. Panamericana*
  96. Khanduja V, Lawrence JE, Audenaert E (2017) Testing the Construct Validity of a Virtual Reality Hip Arthroscopy Simulator. *Arthroscopy : the journal of arthroscopic & related surgery : official publication of the Arthroscopy Association of North America and the International Arthroscopy Association United States* 33:566–571
  97. Khanna K, Brabston EW, Qayyum U, Gardner TR, Levine WN, Jobin CM, Ahmad CS (2018) Proximal Humerus Fracture 3-D Modeling. *American journal of orthopedics (Belle Mead, NJ) United States* 47
  98. Kholgh Eshkalak S, Rezvani Ghomi E, Dai Y, Choudhury D, Ramakrishna S (2020) The role of three-dimensional printing in healthcare and medicine. *Materials & Design* 194:108940
  99. Kim H, Shin MJ, Kholinne E, Seo J, Ahn D, Kim JW, Koh KH (2021) How Many Proximal Screws Are Needed for a Stable Proximal Humerus Fracture Fixation? *Geriatric orthopaedic surgery & rehabilitation United States* 12:2151459321992744
  100. Kim KJ, Kim DH, Lee J II, Choi BK, Han IH, Nam KH (2019) Hounsfield Units on Lumbar Computed Tomography for Predicting Regional Bone Mineral Density. *Open Medicine* 14:545–551
  101. Klug A, Gramlich Y, Wincheringer D, Schmidt-Horlohé K, Hoffmann R (2019) Trends in surgical management of proximal humeral fractures in adults: a nationwide study of records in Germany from 2007 to 2016. *Archives of orthopaedic and trauma surgery Germany* 139:1713–1721
  102. Ko J, Lee JJ, Jang S-W, Yun Y, Kang S, Shin DA, Kim YS (2019) An Epiduroscopy Simulator Based on a Serious Game for Spatial Cognitive Training (EpiduroSIM): User-Centered Design Approach. *JMIR Serious Games* 7:e12678
  103. Kuan F-C, Hsu K-L, Hong C-K, Chen Y, Chiang C-H, Chang H-M, Su W-R (2022) Biomechanical comparisons of hook plate and screw fixations in split-type greater tuberosity fractures of the humerus. *Journal of shoulder and elbow surgery United States* 31:1308–1315

- 
104. Kuhlmann T, Dantlgraber M, Reips U-D (2017) Investigating measurement equivalence of visual analogue scales and Likert-type scales in Internet-based personality questionnaires. *Behavior Research Methods* 49:2173–2181
  105. Lädermann A, Walch G, Denard PJ, Collin P, Sirveaux F, Favard L, Edwards TB, Kherad O, Boileau P (2013) Reverse shoulder arthroplasty in patients with pre-operative impairment of the deltoid muscle. *The bone & joint journal England* 95–B:1106–1113
  106. Lee WQ, Lie HM, Lie DTT (2022) Diagnosis and treatment of avascular necrosis of the humeral head: Current concepts. *Journal of ISAKOS*
  107. Lefevre-Colau MM, Babinet A, Fayad F, Fermanian J, Anract P, Roren A, Kansao J, Revel M, Poiraudreau S (2007) Immediate mobilization compared with conventional immobilization for the impacted nonoperatively treated proximal humeral fracture. A randomized controlled trial. *The Journal of bone and joint surgery American volume United States* 89:2582–2590
  108. Lekic N, Montero NM, Takemoto RC, Davidovitch RI, Egol KA (2012) Treatment of two-part proximal humerus fractures: intramedullary nail compared to locked plating. *HSS journal : the musculoskeletal journal of Hospital for Special Surgery United States* 8:86–91
  109. Lévine C, Garret J, Boileau P, Alami G, Favard L, Walch G (2011) Scapular notching in reverse shoulder arthroplasty: is it important to avoid it and how? *Clinical orthopaedics and related research United States* 469:2512–2520
  110. Levy J, Rosas S, Law TY, Kurowicki J, Kalandiak SP (2017) Ninety-day cost of treatment for proximal humerus fractures: an acute and 90-day cost evaluation. *Orthopaedic Proceedings The British Editorial Society of Bone & Joint Surgery* 99–B:92
  111. Li K, Liu Z, Li X, Wang J (2022) 3D printing-assisted surgery for proximal humerus fractures: a systematic review and meta-analysis. *European journal of trauma and emergency surgery : official publication of the European Trauma Society Germany*
  112. Lim PK, Stephenson GS, Keown TW, Byrne C, Lin CC, Marecek GS, Scolaro JA (2018) Use of 3D Printed Models in Resident Education for the Classification of Acetabulum Fractures. *Journal of surgical education United States* 75:1679–1684
  113. Liu H-X, Xu XX, Xu DL, Hu YZ, Pan X-Y, Yu Z, Xu Y-J (2020) The acromion–greater tuberosity impingement index: A new radiographic measurement and its association with rotator cuff pathology. *Journal of Orthopaedic Surgery SAGE Publications Ltd STM* 28:2309499020913348

114. Logishetty K, Rudran B, Cobb JP (2019) Virtual reality training improves trainee performance in total hip arthroplasty: a randomized controlled trial. *The bone & joint journal England* 101-B:1585–1592
115. Lohre R, Bois AJ, Athwal GS, Goel DP (2020) Improved Complex Skill Acquisition by Immersive Virtual Reality Training: A Randomized Controlled Trial. *The Journal of bone and joint surgery American volume United States* 102:e26
116. Lopiz Y, Garcia-Coiradas J, Garcia-Fernandez C, Marco F (2014) Proximal humerus nailing: a randomized clinical trial between curvilinear and straight nails. *Journal of shoulder and elbow surgery United States* 23:369–376
117. Mahabier KC, Hartog D Den, Van Veldhuizen J, Panneman MJM, Polinder S, Verhofstad MHJ, Van Lieshout EMM (2015) Trends in incidence rate, health care consumption, and costs for patients admitted with a humeral fracture in The Netherlands between 1986 and 2012. *Injury Netherlands* 46:1930–1937
118. Maluta T, Amarossi A, De Masi M, Dorigotti A, Ricci M, Vecchini E, Negri S, Samaila EM, Magnan B (2022) Could direct transdeltoid approach to severely displaced proximal humerus fracture be advantageous for a better reduction? *Acta bio-medica : Atenei Parmensis Italy* 92:e2021580
119. Maluta T, Amarossi A, Dorigotti A, Bagnis F, Samaila EM, De Luca L, Pezze L, Magnan B (2020) External fixation can be an option for proximal humerus fractures Neer 3-4. *Acta bio-medica : Atenei Parmensis Italy* 91:e2020017
120. Marongiu G, Leinardi L, Congia S, Frigau L, Mola F, Capone A (2020) Reliability and reproducibility of the new AO/OTA 2018 classification system for proximal humeral fractures: a comparison of three different classification systems. *Journal of Orthopaedics and Traumatology* 21:4
121. Martinez-Catalan N (2023) Conservative Treatment of Proximal Humerus Fractures: When, How, and What to Expect. *Current reviews in musculoskeletal medicine United States* 16:75–84
122. Martinez-Catalan N, Boileau P (2023) The Role of Intramedullary Nailing for Proximal Humerus Fractures: What Works and What Does Not. *Current reviews in musculoskeletal medicine United States* 16:85–94
123. Martín-Hernández C, Guillén-Soriano M, Ballester-Giménez JJ, López Acevedo-Medina G, Fernández-Esteve F (2006) Tratamiento de las fracturas en dos y tres partes de la extremidad proximal del húmero mediante fijación externa. *Revista Española de Cirugía Ortopédica y Traumatología* 50:335–341

124. Matamala-Gomez M, Slater M, Sanchez-Vives M V (2022) Impact of virtual embodiment and exercises on functional ability and range of motion in orthopedic rehabilitation. *Scientific reports* 12:5046
125. Matsen FA 3rd (2015) The ream and run: not for every patient, every surgeon or every problem. *International orthopaedics Germany* 39:255–261
126. Matsen FA 3rd, Carofino BC, Green A, Hasan SS, Hsu JE, Lazarus MD, McElvany MD, Moskal MJ, Parsons IM 4th, Saltzman MD, Warme WJ (2021) Shoulder Hemiarthroplasty with Nonprosthetic Glenoid Arthroplasty: The Ream-and-Run Procedure. *JBJS reviews United States* 9
127. Matsumura N, Furuhashi R, Seto T, Takada Y, Shirasawa H, Oki S, Kawano Y, Shiono S (2020) Reproducibility of the modified Neer classification defining displacement with respect to the humeral head fragment for proximal humeral fractures. *Journal of orthopaedic surgery and research England* 15:438
128. Mattick A, Wyatt JP (2000) From Hippocrates to the Eskimo--a history of techniques used to reduce anterior dislocation of the shoulder. *Journal of the Royal College of Surgeons of Edinburgh Scotland* 45:312–316
129. McCausland C, Sawyer E, Eovaldi BJ, Varacallo M (2022) *Anatomy, Shoulder and Upper Limb, Shoulder Muscles*. Treasure Island (FL)
130. Mehta S, Chin M, Sanville J, Namdari S, Hast MW (2018) Calcar screw position in proximal humerus fracture fixation: Don't miss high! *Injury Netherlands* 49:624–629
131. Mocini F, Rovere G, De Mauro D, De Sanctis EG, Smakaj A, Maccauro G, Liuzza F (2021) Newer generation straight humeral nails allow faster bone healing and better functional outcome at mid-term. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research* 16:631
132. Mohammed AA, Algahtani MS, Ahmad MZ, Ahmad J, Kotta S (2021) 3D Printing in medicine: Technology overview and drug delivery applications. *Annals of 3D Printed Medicine* 4:100037
133. Moldovan F, Gligor A, Bataga T (2021) Structured Integration and Alignment Algorithm: A Tool for Personalized Surgical Treatment of Tibial Plateau Fractures. *Journal of Personalized Medicine*
134. Moo-Young J, Weber TM, Kapralos B, Quevedo A, Alam F (2021) Development of Unity Simulator for Epidural Insertion Training for Replacing Current Lumbar Puncture Simulators. *Cureus* 13:e13409

135. Muccioli C, Chelli M, Caudal A, Andreani O, Elhor H, Gauci M-O, Boileau P (2020) Rotator cuff integrity and shoulder function after intra-medullary humerus nailing. *Orthopaedics & traumatology, surgery & research : OTSR France* 106:17–23
136. Mulligan J-A, Fox-Rushby J (2003) Unit costs of health care inputs in low and middle income regions. *Disease Control Priorities Project Working Paper 9*, Bethesda (MD)
137. Myers DM, Triplet JJ, Warmoth PJ, Passias BJ, McGowan SP, Taylor BC (2020) Improved Outcomes Using a Fibular Strut in Proximal Humerus Fracture Fixation. *Orthopedics United States* 43:262–268
138. Mystakidis S (2022) Metaverse. *Encyclopedia* 2:486–497
139. Negrillo-Cárdenas J, Jiménez-Pérez J-R, Feito FR (2020) The role of virtual and augmented reality in orthopedic trauma surgery: From diagnosis to rehabilitation. *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 191:105407
140. Neumann PJ, Sanders GD (2017) Cost-Effectiveness Analysis 2.0. *The New England journal of medicine United States* 376:203–205
141. Noh Y-M, Kim DR, Kim C-H, Lee SY (2018) Minimally Invasive Percutaneous Plate Osteosynthesis via a Deltoidsplitting Approach with Strut Allograft for the Treatment of Displaced 3- or 4-part Proximal Humeral Fractures. *Clinics in shoulder and elbow Korea (South)* 21:220–226
142. Nyffeler RW, Seidel A, Werlen S, Bergmann M (2019) Radiological and biomechanical assessment of displaced greater tuberosity fractures. *International orthopaedics Germany* 43:1479–1486
143. O'Donnell JA, Gage MJ (2021) Proximal Humerus Geriatric Fracture Care: Fix, Replace, or Nonoperative Treatment? *Journal of orthopaedic trauma United States* 35:S6–S10
144. Ohl X, Mangin P, Barbe C, Brun V, Nerot C, Sirveaux F (2017) Analysis of four-fragment fractures of the proximal humerus: the interest of 2D and 3D imagery and inter- and intra-observer reproducibility. *European journal of orthopaedic surgery & traumatology : orthopedie traumatologie France* 27:295–299
145. Osterhoff G, O'Hara NN, D'Cruz J, Sprague SA, Bansback N, Evaniew N, Slobogean GP (2017) A Cost-Effectiveness Analysis of Reverse Total Shoulder Arthroplasty versus Hemiarthroplasty for the Management of Complex Proximal Humeral Fractures in the Elderly. *Value in health : the journal of the International Society for Pharmacoeconomics and Outcomes Research United States* 20:404–411

146. Ouyang H, Xiong J, Xiang P, Cui Z, Chen L, Yu B (2013) Plate versus intramedullary nail fixation in the treatment of humeral shaft fractures: an updated meta-analysis. *Journal of shoulder and elbow surgery United States* 22:387–395
147. Pamuk Ç (2022) Reliability of teleconsultation in the diagnosis and treatment of proximal humeral fractures. *Emergency radiology United States* 29:873–878
148. Parisot C (1995) The DICOM standard. *The International Journal of Cardiac Imaging* 11:171–177
149. Parlato A, D'Arienzo A, Ferruzza M, Galvano N, D'Arienzo M (2014) Indications and limitations of the fixator TGF "Gex-Fix" in proximal end humeral fractures. *Injury Netherlands* 45 Suppl 6:S49-52
150. Patch DA, Reed LA, Hao KA, King JJ, Kaar SG, Horneff JG, Ahn J, Strelzow JA, Hebert-Davies J, Little MTM, Krause PC, Johnson JP, Spitler CA (2022) Understanding postoperative rehabilitation preferences in operatively managed proximal humerus fractures: do trauma and shoulder surgeons differ? *Journal of shoulder and elbow surgery United States* 31:1106–1114
151. Paul GM, Rezaenia A, Wen P, Condoor S, Parkar N, King W, Korakianitis T (2018) Medical Applications for 3D Printing: Recent Developments. *Missouri medicine United States* 115:75–81
152. Pavone V, Vescio A, Denaro R, Costa D, Condorelli G, Caruso VF, Sessa G, Testa G (2021) Use of different devices for surgical treatment of proximal humerus fractures in adults: a systematic review. *Acta bio-medica : Atenei Parmensis Italy* 92:e2021198
153. Pitcher A, Langhammer C, Feeley BT (2019) Utility of MRI in the Evaluation of Acute Greater Tuberosity Proximal Humeral Fractures. *Orthopaedic journal of sports medicine United States* 7:2325967119851472
154. Prieto-Alhambra D, Premaor MO, Fina Avilés F, Hermosilla E, Martínez-Laguna D, Carbonell-Abella C, Nogués X, Compston JE, Díez-Pérez A (2012) The association between fracture and obesity is site-dependent: a population-based study in postmenopausal women. *Journal of bone and mineral research : the official journal of the American Society for Bone and Mineral Research United States* 27:294–300
155. Puglisi G, Montemagno M, Denaro R, Condorelli G, Caruso VF, Vescio A, Testa G, Pavone V (2022) 3D-Printed Models versus CT Scan and X-Rays Imaging in the Diagnostic Evaluation of Proximal Humerus Fractures: A Triple-Blind Interobserver Reliability Comparison Study. *Advances in orthopedics Egypt* 2022:5863813

156. Ramos-Maza E, García-Estrada F, Domínguez-Barrios C, Chávez-Covarrubias G, Meza-Reyes G, Buffo-Sequeira I (2016) Principios biomecánicos para la osteosíntesis, re-evolución. *Acta Ortop Mex Nin*:1–8
157. Rangan A, Handoll H, Brealey S, Jefferson L, Keding A, Martin BC, Goodchild L, Chuang L-H, Hewitt C, Torgerson D (2015) Surgical vs nonsurgical treatment of adults with displaced fractures of the proximal humerus: the PROFHER randomized clinical trial. *JAMA United States* 313:1037–1047
158. Reeves B, Jobbins B, Flowers F, Dowson D, Wright V (1972) Some problems in the development of a total shoulder endo-prosthesis. *Annals of the rheumatic diseases England* 31:425–426
159. Revelou M-T, Eleftheriou A, Fezoulidi G, Hatzikyriakou P, Raoulis V, Tsoucalas G (2019) Congenital orthopaedic limp deformities in Corpus Hippocraticum. *International orthopaedics Germany* 43:1993–1998
160. Ring D (2007) Current concepts in plate and screw fixation of osteoporotic proximal humerus fractures. *Injury Netherlands* 38 Suppl 3:S59-68
161. Rouleau DM, Balg F, Benoit B, Leduc S, Malo M, Vézina F, Laflamme GY (2020) Deltopectoral vs. deltoid split approach for proximal HUmerus fracture fixation with locking plate: a prospective RAndomized study (HURA). *Journal of shoulder and elbow surgery United States* 29:2190–2199
162. Roux A, Decroocq L, El Batti S, Bonnevalle N, Moineau G, Trojani C, Boileau P, de Peretti F (2012) Epidemiology of proximal humerus fractures managed in a trauma center. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research* 98:715–719
163. Rowles DJ, McGrory JE (2001) Percutaneous pinning of the proximal part of the humerus. An anatomic study. *The Journal of bone and joint surgery American volume United States* 83:1695–1699
164. Rudolphi-Solero T, Lorenzo-Alvarez R, Ruiz-Gómez MJ, Sendra Portero F (2021) Impact of compulsory participation of medical students in a multiuser online game to learn radiological anatomy and signs within the virtual world Second Life. *Anatomical Sciences Education* 15
165. Ryan D, Zuckerman J, Egol K (2022) Fact or fiction: the “5 mm Rule” in greater tuberosity fractures of the proximal humerus. *European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology* 1–7

- 
166. Saber AY, Said UN, Abdelmonem AH, Elsayed H, Taha M, Hussein W, Al-Hashimi K, El-Omar O, Elbeshbeshy M (2022) Surgical Fixation of Three- and Four-Part Proximal Humeral Fractures Using the Proximal Humeral Interlocking System Plate. *Cureus United States* 14:e25348
167. Sabzevari S, Kim HM, Smith C, McKee MD, Serrano-Riera R, Porteny D, Shi L, Lin A (2023) Proximal Humerus Fractures: Leave It Alone, Fix It, Replace It? Instructional course lectures *United States* 72:211–221
168. Saltzman BM, Erickson BJ, Harris JD, Gupta AK, Mighell M, Romeo AA (2016) Fibular Strut Graft Augmentation for Open Reduction and Internal Fixation of Proximal Humerus Fractures: A Systematic Review and the Authors' Preferred Surgical Technique. *Orthopaedic journal of sports medicine United States* 4:2325967116656829
169. Schnetzke M, Bockmeyer J, Loew M, Studier-Fischer S, Grützner P-A, Guehring T (2018) Rate of avascular necrosis after fracture dislocations of the proximal humerus: Timing of surgery. *Obere Extremität Germany* 13:273–278
170. Schreiber JJ, Anderson PA, Rosas HG, Buchholz AL, Au AG (2011) Hounsfield units for assessing bone mineral density and strength: a tool for osteoporosis management. *The Journal of bone and joint surgery American volume United States* 93:1057–1063
171. Schultz BJ, Lowe DT, Egol KA, Zuckerman JD (2021) Shoulder Hemiarthroplasty for Proximal Humerus Fracture. *Journal of orthopaedic trauma United States* 35:S3–S4
172. Schumaier A, Grawe B (2018) Proximal Humerus Fractures: Evaluation and Management in the Elderly Patient. *Geriatric orthopaedic surgery & rehabilitation* 9:2151458517750516
173. Setaro N, Rotini M, Luciani P, Facco G, Gigante A (2022) Surgical management of 2- or 3-part proximal humeral fractures: comparison of plate, nail and K-wires. *MUSCULOSKELETAL SURGERY* 106:163–167
174. Sharareh B (2023) Reverse Shoulder Arthroplasty. *Orthobullets*
175. Shi X, Liu H, Xing R, Mei W, Zhang L, Ding L, Huang Z, Wang P (2019) Effect of intramedullary nail and locking plate in the treatment of proximal humerus fracture: an update systematic review and meta-analysis. *Journal of orthopaedic surgery and research England* 14:285
176. Shukla DR, McAnany S, Kim J, Overley S, Parsons BO (2016) Hemiarthroplasty versus reverse shoulder arthroplasty for treatment of proximal humeral fractures: a meta-analysis. *Journal of shoulder and elbow surgery United States* 25:330–340

- 
177. Simovitch RW, Roche CP, Jones RB, Routman HD, Marczuk Y, Wright TW, Zuckerman JD (2019) Effect of Tuberosity Healing on Clinical Outcomes in Elderly Patients Treated With a Reverse Shoulder Arthroplasty for 3- and 4-Part Proximal Humerus Fractures. *Journal of Orthopaedic Trauma* 33
178. Soler-Peiro M, García-Martínez L, Aguilera L, Perez-Bermejo M (2020) Conservative treatment of 3-part and 4-part proximal humeral fractures: a systematic review. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research* 15:347
179. Somerson JS, Hsu JE, Gorbaty JD, Gee AO (2016) Classifications in Brief: Goutallier Classification of Fatty Infiltration of the Rotator Cuff Musculature. *Clinical orthopaedics and related research United States* 474:1328–1332
180. Spek RWA, Schoolmeesters BJA, Oosterhoff JHF, Doornberg JN, van den Bekerom MPJ, Jaarsma RL, Eygendaal D, IJpma F (2022) 3D-printed Handheld Models Do Not Improve Recognition of Specific Characteristics and Patterns of Three-part and Four-part Proximal Humerus Fractures. *Clinical orthopaedics and related research* 480:150–159
181. Splavski B, Rotim K, Boop FA, Gienapp AJ, Arnautović KI (2020) Ambroise Paré: His Contribution to the Future Advancement of Neurosurgery and the Hardships of His Times Affecting His Life and Brilliant Career. *World neurosurgery United States* 134:233–239
182. Stern L, Gorczyca MT, Gorczyca JT (2021) Preoperative measurement of the thickness of the center of the humeral head predicts screw cutout after locked plating of proximal humeral fractures. *Journal of shoulder and elbow surgery United States* 30:80–88
183. Stoddart M, Pearce O, Smith J, McCann P, Sheridan B, Al-Hourani K (2020) Proximal Humerus Fractures: Reliability of Neer Versus AO Classification on Plain Radiographs and Computed Tomography. *Cureus United States* 12:e8520–e8520
184. Stolberg-Stolberg J, Köppe J, Rischen R, Freistühler M, Faldum A, Katthagen JC, Raschke MJ (2021) [Influence of complications and comorbidities on length of hospital stay and costs for surgical treatment of proximal humeral fractures]. *Der Chirurg; Zeitschrift für alle Gebiete der operativen Medizin Germany* 92:907–915
185. Sukthankar A V, Leonello DT, Hertel RW, Ding GS, Sandow MJ (2013) A comprehensive classification of proximal humeral fractures: HGLS system. *Journal of shoulder and elbow surgery United States* 22:e1-6

- 
186. Sumrein BO, Huttunen TT, Launonen AP, Berg HE, Felländer-Tsai L, Mattila VM (2017) Proximal humeral fractures in Sweden-a registry-based study. *Osteoporosis international : a journal established as result of cooperation between the European Foundation for Osteoporosis and the National Osteoporosis Foundation of the USA* England 28:901–907
  187. Sun Q, Ge W, Li G, Wu J, Lu G, Cai M, Li S (2018) Locking plates versus intramedullary nails in the management of displaced proximal humeral fractures: a systematic review and meta-analysis. *International orthopaedics Germany* 42:641–650
  188. Sung Y-T, Wu J-S (2018) The Visual Analogue Scale for Rating, Ranking and Paired-Comparison (VAS-RRP): A new technique for psychological measurement. *Behavior research methods United States* 50:1694–1715
  189. Swarup I, O'Donnell JF (2016) An Overview of the History of Orthopedic Surgery. *American journal of orthopedics (Belle Mead, NJ) United States* 45:E434–E438
  190. Taylor BC, Levine W (2015) Shoulder Anterolateral Approach. *Orthobullets*
  191. Taylor BC, Sharareh B (2019) Shoulder Anterior (Deltopectoral) Approach. *Orthobullets*
  192. Testut L, Latarjet A (1996) *Compendio de Anatomía Descriptiva*. Masson E (ed) Elsevier Masson
  193. Thorsness R, Shields E, Iannuzzi JC, Zhang L, Noyes K, Voloshin I (2016) Cost Drivers After Surgical Management of Proximal Humerus Fractures in Medicare Patients. *Journal of orthopaedic trauma United States* 30:262–268
  194. Trafton P, Jaeger M, Leung F, Li W (2011) Deltopectoral approach to the proximal humerus. *AO Surgery Reference*
  195. Trafton P, Jaeger M, Leung F, Li W (2011) Anterolateral approach to the proximal humerus. *AO Surgery Reference*
  196. Trafton P, Jaeger M, Leung F, Li W (2011) Transdeltoid lateral approach to the proximal humerus. *AO Surgery Reference*
  197. Triplet J (2022) Proximal Humerus Fractures. *Orthobullets*
  198. Turini G, Condino S, Sinceri S, Tamadon I, Celi S, Quaglia C, Murzi M, Soldani G, Menciacchi A, Ferrari V, Ferrari M (2017) Patient Specific Virtual and Physical Simulation Platform for Surgical Robot Movability Evaluation in Single-Access Robot-Assisted Minimally-Invasive Cardiothoracic Surgery., pp 211–220

- 
199. Verhey JT, Haglin JM, Verhey EM, Hartigan DE (2020) Virtual, augmented, and mixed reality applications in orthopedic surgery. *The international journal of medical robotics + computer assisted surgery* : MRCAS England 16:e2067
  200. Voutilainen A, Pitkäaho T, Kvist T, Vehviläinen-Julkunen K (2016) How to ask about patient satisfaction? The visual analogue scale is less vulnerable to confounding factors and ceiling effect than a symmetric Likert scale. *Journal of advanced nursing* England 72:946–957
  201. Walbron P, Common H, Thomazeau H, Hosseini K, Peduzzi L, Bulaid Y, Sirveaux F (2020) Virtual reality simulator improves the acquisition of basic arthroscopy skills in first-year orthopedic surgery residents. *Orthopaedics & traumatology, surgery & research* : OTSR France 106:717–724
  202. Wang C, Huang W, Zhou Y, He L, He Z, Chen Z, He X, Tian S, Liao J, Lu B, Wei Y, Wang M (2020) 3D printing of bone tissue engineering scaffolds. *Bioactive Materials* 5:82–91
  203. Wang F, Wang Y, Dong J, He Y, Li L, Liu F, Dong J (2021) A novel surgical approach and technique and short-term clinical efficacy for the treatment of proximal humerus fractures with the combined use of medial anatomical locking plate fixation and minimally invasive lateral locking plate fixation. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research* 16:29
  204. Wheeler G, Deng S, Toussaint N, Pushparajah K, Schnabel J, Simpson J, Gomez A (2018) Virtual Interaction and Visualisation of 3D Medical Imaging Data with VTK and Unity. *Healthcare Technology Letters* 5
  205. Woon C, Romeo A (2022) Glenohumeral Joint Anatomy, Stabilizer, and Biomechanics. *Orthobullets*
  206. Xiang H, Wang Y, Yang Y, Liu F, Lu Q, Kong L, Li M, Han Y, Wang F (2022) Anatomical study for the treatment of proximal humeral fracture through the medial approach. *Journal of orthopaedic surgery and research* England 17:35
  207. Xie L, Zhang Y, Chen C, Zheng W, Chen H, Cai L (2019) Deltoid-split approach versus deltopectoral approach for proximal humerus fractures: A systematic review and meta-analysis. *Orthopaedics & traumatology, surgery & research* : OTSR France 105:307–316
  208. Xing B, Zhang Y, Hou X, Li Y, Li G, Han G (2021) Digital analysis of external fixation area of proximal humerus fractures in elderly patients. *BMC Musculoskeletal Disorders* 22:991

209. Xu J, Ji J, Jiao J, Zheng L, Hong Q, Tang H, Zhang S, Qu X, Yue B (2022) 3D Printing for Bone-Cartilage Interface Regeneration. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 10
210. Yamine K, Karbala J, Maalouf A, Daher J, Assi C (2022) Clinical outcomes of the use of 3D printing models in fracture management: a meta-analysis of randomized studies. *European journal of trauma and emergency surgery : official publication of the European Trauma Society Germany* 48:3479–3491
211. Yaprak G, Gemici C, Seseogullari OO, Karabag IS, Cini N (2020) CT Derived Hounsfield Unit: An Easy Way to Determine Osteoporosis and Radiation Related Fracture Risk in Irradiated Patients. *Frontiers in oncology Switzerland* 10:742
212. Yazdanpanah Z, Johnston JD, Cooper DML, Chen X (2022) 3D Bioprinted Scaffolds for Bone Tissue Engineering: State-Of-The-Art and Emerging Technologies. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 10
213. You W, Liu LJ, Chen HX, Xiong JY, Wang DM, Huang JH, Ding JL, Wang DP (2016) Application of 3D printing technology on the treatment of complex proximal humeral fractures (Neer3-part and 4-part) in old people. *Orthopaedics & traumatology, surgery & research : OTSR France* 102:897–903
214. Zacharia B, Puthezhath K, Varghees I (2016) Kirschner wire migration from subcapital humeral fracture site, causing hydropneumothorax. *Chinese journal of traumatology China* 19:305–308
215. Zhang H, He Y, Chen Y, Liu J, Jin Q, Xu S, Fu X, Qiao J, Yu B, Niu F (2021) Virtual Reality and Three-Dimensional Printed Models Improve the Morphological Understanding in Learning Mandibular Sagittal Split Ramus Osteotomy: A Randomized Controlled Study. *Frontiers in surgery* 8:705532
216. Zhang J, Ebraheim N, Lause GE (2012) Surgical treatment of proximal humeral fracture with external fixator. *Journal of shoulder and elbow surgery United States* 21:882–886
217. Zhang Y, Xu J, Fei Z, Dai H, Fan Q, Yang Q, Chen Y, Wang B, Wang C (2021) 3D Printing Scaffold Vaccine for Antitumor Immunity. *Advanced Materials* 33:2106768
218. Zhao J-G, Wang J, Wang C, Kan S-L (2015) Intramedullary nail versus plate fixation for humeral shaft fractures: a systematic review of overlapping meta-analyses. *Medicine United States* 94:e599



## VIII. Anexos

### VIII.1. Enlaces al artículo y referencia JCR a día de presentación de la tesis.


<https://link.springer.com/article/10.1007/s10055-023-00757-4>



Home > Virtual Reality > Article

Original Article | [Open Access](#) | [Published: 04 February 2023](#)

## New technologies for the classification of proximal humeral fractures: Comparison between Virtual Reality and 3D printed models—a randomised controlled trial

[Rafael Almirón Santa-Bárbara](#) , [Francisco García Rivera](#), [Maurice Lamb](#), [Rodrigo Viquez Da-Silva](#) & [Mario Gutiérrez Bedmar](#)

*Virtual Reality* (2023) | [Cite this article](#)

762 Accesses | 3 Altmetric | [Metrics](#)

#### EDITION

Science Citation Index Expanded (SCIE)

#### CATEGORY

COMPUTER SCIENCE, SOFTWARE ENGINEERING

**14/110**

JCR YEAR	JIF RANK	JIF QUARTILE	JIF PERCENTILE	
2021	14/110	Q1	87.73	
2020	10/108	Q1	91.20	
2019	15/108	Q1	86.57	
2018	18/107	Q1	83.64	
2017	49/104	Q2	53.37	

## VIII.2. Consentimiento informado a los entrevistados

### FORMULARIO DE INFORMACIÓN Y CONSENTIMIENTO INFORMADO ESCRITO

Orden de 8 de julio de 2009 (BOJA nº 152 de fecha 6 de agosto) por la que se dictan instrucciones a los Centros del Sistema Sanitario Público de Andalucía, en relación al procedimiento de Consentimiento Informado.

#### **1. CONSENTIMIENTO INFORMADO DEL ESTUDIO: NUEVAS TECNOLOGÍAS 3D EN LA INTERPRETACIÓN DE FRACTURAS DE HÚMERO PROXIMAL DURANTE LA FORMACIÓN SANITARIA EN CIRUGÍA ORTOPÉDICA Y TRAUMATOLOGÍA: ESTUDIO DE CONCORDANCIA INTEROBSERVADOR.**

Este documento sirve para que usted, o quien lo represente, dé su consentimiento para esta intervención. Eso significa que nos autoriza a realizarla.

Puede usted retirar este consentimiento cuando lo desee. Firmarlo no le obliga a usted a hacerse la intervención. De su rechazo no se derivará ninguna consecuencia adversa respecto a la calidad del resto de la atención recibida. Antes de firmar, es importante que lea despacio la información siguiente.

Díganos si tiene alguna duda o necesita más información. Le atenderemos con mucho gusto

#### 1.1 Cómo se han obtenido las imágenes a estudiar:

Al firmar este consentimiento usted admite ser residente de la especialidad de Cirugía Ortopédica y Traumatología y encontrarse, en el momento de la firma, estar cursando la residencia ya mencionada en un hospital público andaluz.

En este estudio se pretende realizar una comparativa sobre los criterios diagnósticos de cada residente en función de su hospital de referencia y año de formación en torno a las fracturas de húmero proximal.

Para ello, se presentarán un total de 36 casos de fracturas de húmero proximal intervenidas en el Hospital de Antequera. Las imágenes han sido tomadas de pacientes intervenidos y que han firmado el consentimiento estandarizado de la junta de Andalucía para fracturas y luxaciones articulares. Así, todos ellos han dado su autorización en el apartado 2.3 para "la utilización de imágenes con fines docentes o de difusión de conocimiento científico", en la página 8 del mismo. Todos y cada uno de los 36 pacientes marcaron la casilla "Sí" a esta premisa, y el consentimiento firmado se encuentra en su historia clínica, ya sea digitalizada o en papel, dentro de la historia clínica hospitalaria.

En el siguiente enlace se adjunta el documento mencionado

[https://juntadeandalucia.es/export/drupaljda/salud\\_5af958647243c\\_formulario\\_fracturas\\_luxaciones\\_articulares.pdf](https://juntadeandalucia.es/export/drupaljda/salud_5af958647243c_formulario_fracturas_luxaciones_articulares.pdf)

Se ha realizado un procesamiento intrahospitalario de las imágenes con fines docentes y de investigación, en un ordenador desconectado de toda red ajena al Sistema Andaluz de Salud. El procesamiento ha sido realizado con los programas InVesalius, Mesh-Mixer y Cura. Además, se ha diseñado un software independiente para poder visualizar las imágenes del grupo de holografía.

### 1.2 En qué consistirá la intervención realizada sobre usted

Al firmar este documento, usted acepta entrar en el presente estudio.

En primer lugar será sometido a un proceso de aleatorización mediante un sistema de papeles en una bolsa opaca. Al inicio del estudio, habrá el mismo número de papeles para cada grupo en la bolsa. Una vez se saque el papel, no volverá a la bolsa, con el objetivo de conseguir el mismo número de residentes en cada grupo. Habrá tantos papeles como residentes se comprometan a tomar parte en el estudio.

Respecto a los grupos, cada uno será sometido a un cuestionario de distintas características:

- **Grupo 1:** Cuestionario con modelos físicos de impresión 3D – Esto es, se presentará a los residentes un total de 36 modelos impresos en 3D y tendrán que clasificarlos según la clasificación de Neer y de HGLS. Los modelos se presentarán de manera aleatorizada.
- **Grupo 2:** Cuestionario con modelos enseñados en holografía – Esto es, igual que el grupo anterior, pero en vez de presentarse los modelos como imágenes impresas, se hará a través de tecnología VR u holografía mediante unas gafas de realidad virtual Oculus Quest 2.

Estos cuestionarios estarán anonimizados, y sólo tendrá que dar las respuestas ya mencionadas. Además, deberá escribir el año de residencia que actualmente está cursando, cuál es su centro referencia y rellenar una breve encuesta de satisfacción.

Los datos obtenidos serán tratados de manera totalmente anonimizada y por grupos. No se revelarán datos individualizados sobre las respuestas dadas en cada cuestionario.

A posteriori, sus respuestas serán enfrentadas contra un Gold Standard (diagnóstico dado por comité de expertos). Por último, se analizará la concordancia mediante la variable Kappa de Cohen, con el objetivo de realizar un estudio de concordancia interobservador que demuestre la no inferioridad de la holografía frente a la impresión 3D en el diagnóstico de fracturas de húmero proximal y su utilidad en la formación en residentes de Cirugía Ortopédica y Traumatología

### 1.3 ¿Cómo se realiza?

En una habitación, solamente acompañado de un investigador que comprobará que el cuestionario se rellena de manera correcta según el protocolo, o para responder dudas metodológicas.

Se dispondrá de todo el tiempo que sea necesario.

Podrá preguntar cualquier duda y le será respondida.

### 1.4 ¿Qué beneficios le producirá?

Le familiarizará con las nuevas tecnologías en 3D.

Presumiblemente, servirá como un método de aprendizaje y entendimiento de las fracturas de húmero proximal.

En caso de desear formación respecto a las nuevas tecnologías 3D, podrá recibirla.

### 1.5 ¿Qué perjuicios puede suponer?

En personas del grupo 2 y que no estén habituadas al uso de gafas de realidad virtual, puede sufrir discretos episodios de mareo y vértigo autolimitados por un breve periodo de tiempo durante la prueba y durante algunos minutos tras ella.

Si padece de alguna condición neurológica u oftalmológica o presenta antecedentes de epilepsia deberá advertir al investigador y será ineditamente descartado del estudio en caso de caer en el grupo 2. Su papel, en este caso, será retornado a la bolsa.

No hay otros perjuicios esperables.

## **2. OTRAS CUESTIONES PARA LAS QUE LE PEDIMOS SU CONSENTIMIENTO:**

- A veces, durante la intervención, se producen hallazgos imprevistos. Pueden obligar a tener que modificar la forma de hacer la intervención y utilizar variantes de la misma no contempladas inicialmente.

- Puede hacer falta tomar imágenes, como fotos o videos. Sirven para documentar mejor el caso. También pueden usarse para fines docentes de difusión del conocimiento científico. En cualquier caso, serán usadas si usted da su autorización. Su identidad siempre será preservada de forma confidencial.

## **3. CONSENTIMIENTO INFORMADO**

### 3.1 Aceptación de la intervención:

Apellidos y nombre del paciente

DNI

Yo, con nombre, apellidos y DNI correspondientes a los escritos en la sección superior a este párrafo, admito que actualmente soy Residente de Cirugía Ortopédica y Traumatología y tengo como centro referencia un Hospital Público del Sistema Andaluz de Salud.

Así mismo, he leído y comprendido la información anterior. He podido preguntar y aclarar todas mis dudas. Por eso he tomado consciente y libremente la decisión de autorizarla. También sé que puedo retirar mi consentimiento cuando lo estime oportuno. Así:

Autorizo a que se realicen las actuaciones oportunas, incluyendo modificaciones en la forma de realizar la intervención.

Autorizo la conservación y utilización posterior de los datos obtenidos del estudio.

Autorizo que, en caso de que mis respuestas vayan a ser utilizadas en otras investigaciones diferentes, los investigadores puedan usar estos datos anónimos sin necesidad de volver a contactarme.

Autorizo la utilización de imágenes con fines docentes o de difusión del conocimiento científico.

Así, con la firma que plasmo bajo este párrafo, consiento todo lo anteriormente establecido:

En \_\_\_\_\_ a \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

Firmado: \_\_\_\_\_

### 3.2 Rechazo de la intervención:

Apellidos y nombre del paciente

DNI

\_\_\_\_\_

Yo, con nombre, apellidos y DNI correspondientes a los escritos en la sección superior a este párrafo, admito que actualmente soy Residente de Cirugía Ortopédica y Traumatología y tengo como centro referencia un Hospital Público del Sistema Andaluz de Salud.

Así mismo, he leído y comprendido la información anterior. He podido preguntar y aclarar todas mis dudas. Por eso he tomado consciente y libremente la decisión de rechazarla.

Así, con la firma que plasmo bajo este párrafo, rechazo todo lo anteriormente establecido:

En \_\_\_\_\_ a \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

Firmado: \_\_\_\_\_

### 3.3 Revocación de la intervención:

Apellidos y nombre del paciente

DNI

\_\_\_\_\_

Yo, con nombre, apellidos y DNI correspondientes a los escritos en la sección superior a este párrafo, admito que actualmente soy Residente de Cirugía Ortopédica y Traumatología y tengo como centro referencia un Hospital Público del Sistema Andaluz de Salud.

Así mismo, he leído y comprendido la información anterior. He podido preguntar y aclarar todas mis dudas. Por eso he tomado consciente y libremente la decisión de revocarla.

Así, con la firma que plasmó bajo este párrafo, revoco el consentimiento previamente aceptado:

En \_\_\_\_\_ a \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Firmado: \_\_\_\_\_

#### 4. CONSENTIMIENTO INFORMADO

Todos los datos obtenidos, tanto como imágenes diagnósticas como las respuestas recibidas, serán utilizadas como datos anonimizados, aleatorizados, agrupados y disgregados, de manera que no se podrán relacionar en ningún momento con los pacientes o los observadores de la investigación.

Las respuestas no serán reveladas a ninguna otra fuente.

Los datos serán guardados en dependencias hospitalarias bajo llave, y sólo se utilizarán para fines investigadores.

En caso de que un observador desee la destrucción de sus respuestas, podrá solicitarlo en cualquier momento y, firmando la revocación del presente consentimiento, será llevado a cabo. Las respuestas de cada residente tendrán un número de referencia de 9 dígitos aleatorios que los investigadores no podrán asociar con cada residente. Sólo el observador conocerá su número de referencia correspondiente, con el objetivo de poder destruir los datos como se ha mencionado si así lo desea.

### VIII.3. Consentimiento informado a los pacientes con fractura de húmero proximal

JUNTA DE ANDALUCÍA

CONSEJERÍA DE SALUD

#### FORMULARIO DE INFORMACIÓN Y CONSENTIMIENTO INFORMADO ESCRITO

Orden de 8 de julio de 2009 (BOJA nº 152 de fecha 6 de agosto) por la que se dictan instrucciones a los Centros del Sistema Sanitario Público de Andalucía, en relación al procedimiento de Consentimiento Informado.

<b>CENTRO SANITARIO</b>	<b>SERVICIO DE</b>
-------------------------	--------------------

#### 1. DOCUMENTO DE INFORMACIÓN PARA (\*) TRATAMIENTO QUIRÚRGICO DE FRACTURAS Y LUXACIONES ARTICULARES

Este documento sirve para que usted, o quien lo represente, dé su consentimiento para esta intervención. Eso significa que nos autoriza a realizarla.

Puede usted retirar este consentimiento cuando lo desee. Firmarlo no le obliga a usted a hacerse la intervención. De su rechazo no se derivará ninguna consecuencia adversa respecto a la calidad del resto de la atención recibida. Antes de firmar, es importante que lea despacio la información siguiente.

Díganos si tiene alguna duda o necesita más información. Le atenderemos con mucho gusto.

(\*) Indicar el nombre del procedimiento/intervención a realizar; si es posible, además del nombre técnico que siempre debe figurar, puede tratar de expresarlo con un nombre más sencillo.

##### 1.1 LO QUE USTED DEBE SABER:

###### EN QUÉ CONSISTE. PARA QUÉ SIRVE:

La intervención consiste en recolocar la articulación y los fragmentos de hueso en la posición más parecida posible a la que tenían antes de dañarse. Si es necesario, se emplean materiales muy diversos para mantenerlos en la posición correcta (tornillos, placas, agujas, alambres...).

Dependiendo del tipo de lesión, las actuaciones para recuperar la forma y función de la articulación pueden variar:

- Luxación: Dislocación (el hueso se ha salido de su sitio). El objetivo inmediato es volver a colocar el hueso en su sitio (reducción). Puede ser suficiente con eso, o puede ser necesario hacer algún tipo de fijación para evitar que vuelva a salirse. En ocasiones la reducción cerrada no es posible y necesitamos abrir la piel y llegar hasta la articulación.

- Fractura-luxación: El hueso se ha salido de su sitio y además se ha roto. El objetivo es reducir la luxación, y volver a colocar en su sitio el fragmento de hueso que se ha roto. Lo más habitual es que necesitemos operar para alcanzar y estabilizar el fragmento roto.

- Fractura articular: Se trata de una fractura que rompe las superficies de deslizamiento de la articulación. El objetivo fundamental es recolocar y estabilizar los fragmentos rotos, lo más parecido posible a como estaban antes del traumatismo.

- Fractura o luxación abierta: Cuando el traumatismo lesiona la piel y los extremos del hueso roto han estado en contacto con el exterior. Primero habrá que limpiar e inmovilizar provisionalmente el hueso dañado. La intervención definitiva deberá retrasarse hasta el momento en que los tejidos lesionados se encuentren en situación óptima y no existan signos de infección.

001530

## JUNTA DE ANDALUCÍA

## CONSEJERÍA DE SALUD

El objetivo de la intervención es ayudar a que la cicatrización se consiga en la posición más favorable y en el menor tiempo posible, y evitar o paliar las secuelas de estas lesiones.

---

### CÓMO SE REALIZA:

Dependiendo del tipo de lesión, el procedimiento para la reducción y fijación de la fractura o luxación puede:

- Realizarse por manipulación desde el exterior sin abrir la piel, o con mínimas heridas para colocar agujas o fijadores,
- O puede necesitar abrir la piel para poder colocar los fragmentos y el material de fijación (agujas, tornillos, alambres, placas, fijadores externos, clavos).

Tras la operación, es habitual inmovilizar la extremidad operada con yeso o vendajes. Así dolerá menos y facilitará la cicatrización de los tejidos lesionados.

En fracturas complejas o con múltiples fragmentos, puede ser necesario añadir injerto de hueso extraído de otra parte del cuerpo o de banco de hueso.

Cuando las lesiones articulares son muy graves, con muchos fragmentos o con lesiones muy severas de las partes blandas, la reconstrucción resulta imposible. En estos casos puede ser necesario colocar una prótesis (si es posible) o dejar fija la articulación de forma permanente y definitiva (artrodesis).

La operación necesita anestesia general, o de la extremidad que se va a intervenir. El servicio de anestesia estudiará su caso y le informará del tipo de anestesia más adecuada para usted.

Dependiendo del tipo de operación, de la parte del cuerpo intervenida y de su estado previo de salud, puede precisar medicación para disminuir el riesgo de infección o de trombosis.

---

### QUÉ EFECTOS LE PRODUCIRÁ:

- Durante un tiempo presentará molestias debidas a la cirugía y al proceso de cicatrización.
- Durante unos días necesitará reposo con el miembro intervenido en alto.
- Por lo general se utilizará algún dispositivo de inmovilización (férulas, ortesis) y restricciones en la actividad física hasta la curación de la lesión.
- Al principio presentará pérdida de fuerza que recuperará a medida que vaya ejercitando la extremidad.
- Si se trataba de una fractura o luxación abierta es muy probable que se deban realizar curas repetidas de las heridas hasta la cicatrización definitiva.
- Una articulación luxada o fracturada no resiste las cargas y esfuerzos de una actividad normal, de ahí que la vuelta a la actividad física previa deba ser progresiva.

001530

## JUNTA DE ANDALUCIA

## CONSEJERÍA DE SALUD

- Según el tipo de operación y de anestesia, puede necesitar una sonda de orina durante algunos días.
- Debido a la pérdida de sangre provocada por la lesión y por la operación, puede presentarse anemia que necesite transfusiones o suplementos de hierro.
- En caso de que haya que fijar la articulación lesionada (artrodesis), el movimiento de esa articulación se perderá por completo y para siempre.

---

### EN QUÉ LE BENEFICIARÁ:

Con la intervención conseguirá evitar o disminuir la importancia de las secuelas que produce una fractura articular o una luxación no tratada: dolor, deformidad, reposo e inmovilización más prolongados, pérdida de movilidad, atrofia, artrosis, incapacidad para volver a realizar las actividades habituales, invalidez... Además, los huesos fracturados o luxados pueden producir lesiones en otras estructuras.

---

### OTRAS ALTERNATIVAS DISPONIBLES EN SU CASO:

En algunos tipos de fracturas articulares o fracturas-luxación existe la posibilidad de alinear y recolocar los huesos rotos, y colocar algún tipo de inmovilización que los mantenga en su sitio (escayola, vendajes, tracciones, reposo absoluto).

Estos tratamientos suelen ser más prolongados en el tiempo y no están exentos de riesgo, en especial problemas circulatorios, atrofia ósea y muscular, rigidez de articulaciones, pérdida de la alineación correcta de los huesos rotos o dificultad para que el hueso pegue. Algunas de estas secuelas pueden necesitar que se realicen operaciones para corregirlas.

Una articulación fracturada posiblemente terminará por desarrollar una artrosis temprana, y este riesgo es mayor cuanto peor colocados queden los fragmentos rotos.

En el caso de las luxaciones, cuando no es posible recolocar los huesos sin operar, la única alternativa es dejar los huesos mal colocados, con la consiguiente deformidad, pérdida de movilidad, inestabilidad, dolor persistente y aumento del riesgo de compresión circulatoria o de nervios cercanos.

En su caso:

---

### QUÉ RIESGOS TIENE:

Cualquier actuación médica tiene riesgos. La mayor parte de las veces los riesgos no se materializan, y la intervención no produce daños o efectos secundarios indeseables. Pero a veces no es así. Por eso es importante que usted conozca los riesgos que pueden aparecer en este proceso o intervención.

- La recuperación completa de la movilidad de una articulación lesionada puede no alcanzarse nunca.

001530

## JUNTA DE ANDALUCIA

## CONSEJERÍA DE SALUD

- Tras la operación es normal sentir dolor o molestias en las zonas cercanas. Por lo general desaparecen en pocos días, pero existe el riesgo de que se prolonguen en el tiempo o se hagan continuas.
- Anemia postoperatoria que puede necesitar una transfusión sanguínea.
- En pacientes de edad avanzada es frecuente que tras la intervención y durante el ingreso aparezca confusión, desorientación, agitación y dificultad para dormir. Esto suele desaparecer a las semanas del alta.
- Retardo de consolidación: A veces, los fragmentos del hueso operado tardan más tiempo en lograr una unión satisfactoria y esto obliga a prolongar el tratamiento.
- Calcificaciones y miositis osificante: La cicatrización de los tejidos lesionados durante un traumatismo o una operación puede complicarse y formar acúmulos de calcio que limiten o bloqueen por completo la movilidad de las articulaciones.
- Acortamiento, alargamiento o rotación del hueso operado que provoque alteraciones en el eje de la extremidad.
- Intolerancia al material utilizado para fijar el hueso que puede obligar a su retirada.
- Complicaciones de la cicatriz: Existe el riesgo de que la cicatriz de la operación sea dolorosa o poco estética.
- Necrosis cutánea: La pérdida del riego sanguíneo de la piel próxima a la herida puede hacer necesaria la extirpación de zonas de piel muerta y su cobertura con injertos.
- En el lugar del que se extrae el injerto de hueso existe riesgo de infección, hematomas, fracturas o dolor residual.
- Fractura del hueso que se manipula durante la intervención.

- LOS MÁS FRECUENTES:

- En estas lesiones es habitual que la movilidad completa no llegue a recuperarse nunca, pero con el tratamiento adecuado suele alcanzarse una movilidad satisfactoria. Dependiendo de la gravedad de las lesiones, la pérdida de movilidad o la rigidez articular puede prolongarse en el tiempo o llegar a ser permanente.
- Rotura, movilización o aflojamiento de los materiales empleados para la fijación (tornillos, placas, etc.). Si esto sucede antes de que el hueso haya unido, es muy probable que necesite una nueva operación; si ocurre después, dependerá de las molestias que provoque.

- LOS MÁS GRAVES:

001530

## JUNTA DE ANDALUCIA

## CONSEJERÍA DE SALUD

- Infección: Toda cirugía tiene riesgo de infección. La infección puede ser superficial (localizada justo bajo la piel) o profunda (afecta a músculos, hueso y a la articulación). Si esto ocurre, se realizará tratamiento con antibióticos y se evaluará la necesidad de otros procedimientos (curas locales, limpieza de la herida en quirófano, administración de antibióticos en el lugar de la infección e incluso la retirada del material implantado).

- Hemorragia: Durante la intervención pueden lesionarse vasos sanguíneos cercanos. A veces es necesaria una segunda operación para frenar el sangrado.

- Trombosis Venosa y Tromboembolismo Pulmonar: Formación de trombos en las venas de la extremidad provocando edema y dolor. Estos trombos pueden desprenderse y generar complicaciones pulmonares agudas con consecuencias graves y riesgo de muerte.

- Pseudoartrosis: En ocasiones, los fragmentos del hueso operado no consiguen unirse, y esto suele obligar a plantear una nueva operación.

- Necrosis avascular: Daño en el riego sanguíneo del hueso lesionado y aparición de una zona de hueso muerto que puede dificultar la cicatrización del hueso o ser causa de una artrosis futura.

- Distrofia simpático-refleja: En las zonas próximas al sitio de una operación puede producirse una pérdida de movilidad en las articulaciones, descalcificación de los huesos, inflamación, dolor, alteraciones de temperatura, sensibilidad, coloración y sudoración. Esta situación puede incapacitarle y necesitar tratamiento médico y rehabilitador prolongado.

- Embolia grasa: Paso de gotitas de grasa del interior del hueso a la circulación sanguínea que puede producir un fallo respiratorio agudo.

- Síndrome compartimental: Aumento de presión dentro de algún grupo muscular que puede provocar lesiones de los vasos, de los nervios y alteraciones musculares irreversibles.

- Lesión de nervios de la extremidad que puede provocar distintos grados de pérdida de sensibilidad o parálisis. Esta lesión puede ser temporal o definitiva.

- Lesión de un vaso sanguíneo principal de la extremidad que necesite intervenciones de cirugía vascular para su reparación. Si la lesión es irreparable puede requerir la amputación de la extremidad.

- Intolerancia al material utilizado para fijar el hueso que puede obligar a su retirada.

- LOS DERIVADOS DE SUS PROBLEMAS DE SALUD:

---

**SITUACIONES ESPECIALES QUE DEBEN SER TENIDAS EN CUENTA:**

001530

## JUNTA DE ANDALUCIA

## CONSEJERÍA DE SALUD

Existen situaciones en las cuales la conveniencia de esta intervención puede ser dudosa o cuestionable:

- Enfermedad circulatoria grave.
- Infección o lesiones de la piel en la extremidad que se va a operar.
- Edad: En pacientes ancianos y con poca actividad previa, los riesgos de intervenir pueden llegar a ser muy altos y la posibilidad de obtener beneficios, muy escasa.
- Pacientes que por cuestiones personales o sociales no van a seguir las recomendaciones y cuidados posteriores a la intervención.
- Otras: Hay pacientes que pueden presentar situaciones que supongan un riesgo muy elevado para la anestesia.

Deberá comunicar al personal sanitario cualquier situación de este tipo antes de la intervención.

---

OTRAS INFORMACIONES DE INTERÉS (a considerar por el/la profesional):

---

OTRAS CUESTIONES PARA LAS QUE LE PEDIMOS SU CONSENTIMIENTO:

- A veces, durante la intervención, se producen hallazgos imprevistos. Pueden obligar a tener que modificar la forma de hacer la intervención y utilizar variantes de la misma no contempladas inicialmente.

- A veces es necesario tomar muestras biológicas para estudiar mejor su caso. Pueden ser conservadas y utilizadas posteriormente para realizar investigaciones relacionadas con la enfermedad que usted padece. No se usarán directamente para fines comerciales. Si fueran a ser utilizadas para otros fines distintos se le pediría posteriormente el consentimiento expreso para ello. Si no da su consentimiento para ser utilizadas en investigación, las muestras se destruirán una vez dejen de ser útiles para documentar su caso, según las normas del centro. En cualquier caso, se protegerá adecuadamente la confidencialidad en todo momento.

- También puede hacer falta tomar imágenes, como fotos o videos. Sirven para documentar mejor el caso. También pueden usarse para fines docentes de difusión del conocimiento científico. En cualquier caso serán usadas si usted da su autorización. Su identidad siempre será preservada de forma confidencial.

001530

**JUNTA DE ANDALUCIA**

**CONSEJERÍA DE SALUD**

**1.2 IMÁGENES EXPLICATIVAS:**

(En este espacio podrán insertarse con carácter opcional imágenes explicativas, esquemas anatómicos, pictogramas etc. que faciliten y permitan explicar de manera más sencilla la información al paciente.)

---

001530

## JUNTA DE ANDALUCÍA

## CONSEJERÍA DE SALUD

CENTRO SANITARIO	SERVICIO DE TRAUMATOLOGÍA
------------------	---------------------------

## 2. CONSENTIMIENTO INFORMADO

(En el caso de INCAPACIDAD DEL/DE LA PACIENTE será necesario el consentimiento del/de la representante legal)

(En el caso del MENOR DE EDAD, cuando se considere que carece de madurez suficiente, el consentimiento lo darán sus representantes legales, aunque el menor siempre será informado de acuerdo a su grado de entendimiento y, si tiene más de 12 años, se escuchará su opinión. Si el paciente está emancipado o tiene 16 años cumplidos será el quien otorgue el consentimiento. Sin embargo, en caso de actuación de grave riesgo, según el criterio del facultativo, los representantes legales también serán informados y su opinión será tenida en cuenta para la decisión.)

## 2.1 DATOS DEL/DE LA PACIENTE Y DE SU REPRESENTANTE LEGAL (si es necesario)

APELLIDOS Y NOMBRE, DEL PACIENTE	DNI / NIE
APELLIDOS Y NOMBRE, DEL/DE LA REPRESENTANTE LEGAL	DNI / NIE

## 2.2 PROFESIONALES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE INFORMACIÓN Y/O CONSENTIMIENTO

APELLIDOS Y NOMBRE	FECHA	FIRMA
APELLIDOS Y NOMBRE	FECHA	FIRMA
APELLIDOS Y NOMBRE	FECHA	FIRMA
APELLIDOS Y NOMBRE	FECHA	FIRMA
APELLIDOS Y NOMBRE	FECHA	FIRMA

## 2.3 CONSENTIMIENTO

Yo, D/Dña \_\_\_\_\_, manifiesto que estoy conforme con la intervención que se me ha propuesto. He leído y comprendido la información anterior. He podido preguntar y aclarar todas mis dudas. Por eso he tomado consciente y libremente la decisión de autorizarla. También sé que puedo retirar mi consentimiento cuando lo estime oportuno.

SI  NO Autorizo a que se realicen las actuaciones oportunas, incluyendo modificaciones en la forma de realizar la intervención, para evitar los peligros o daños potenciales para la vida o la salud, que pudieran surgir en el curso de la intervención.

SI  NO Autorizo la conservación y utilización posterior de mis muestras biológicas para investigación relacionada directamente con la enfermedad que padezco.

SI  NO Autorizo que, en caso de que mis muestras biológicas vayan a ser utilizadas en otras investigaciones diferentes, los investigadores se pongan en contacto conmigo para solicitarme consentimiento.

SI  NO Autorizo la utilización de imágenes con fines docentes o de difusión del conocimiento científico.

(NOTA: Márquese con una cruz.)

001530

En \_\_\_\_\_ a \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

EL/LA PACIENTE \_\_\_\_\_ Consentimiento/Visto Bueno de EL/LA REPRESENTANTE LEGAL \_\_\_\_\_

Fdo.:

Fdo.:

JUNTA DE ANDALUCÍA

CONSEJERÍA DE SALUD

CENTRO SANITARIO	SERVICIO DE TRAUMATOLOGÍA
------------------	---------------------------

**2.4 RECHAZO DE LA INTERVENCIÓN**

Yo, D/Dña. \_\_\_\_\_, no autorizo a la realización de esta intervención. Asumo las consecuencias que de ello puedan derivarse para la salud o la vida.

En \_\_\_\_\_ a \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

EL/LA PACIENTE \_\_\_\_\_ Consentimiento/Visto Bueno de EL/LA REPRESENTANTE LEGAL \_\_\_\_\_

Fdo.: \_\_\_\_\_ Fdo.: \_\_\_\_\_

**2.5 REVOCACIÓN DEL CONSENTIMIENTO**

Yo, D/Dña. \_\_\_\_\_, de forma libre y consciente he decidido retirar el consentimiento para esta intervención. Asumo las consecuencias que de ello puedan derivarse para la salud o la vida.

En \_\_\_\_\_ a \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

EL/LA PACIENTE \_\_\_\_\_ Consentimiento/Visto Bueno de EL/LA REPRESENTANTE LEGAL \_\_\_\_\_

Fdo.: \_\_\_\_\_ Fdo.: \_\_\_\_\_

001530

## VIII.4. Permisos concedidos para el uso de imágenes


13/3/23, 18:06

RightsLink - Your Account

WOLTERS KLUWER HEALTH, INC. LICENSE  
TERMS AND CONDITIONS

Mar 13, 2023

This Agreement between University of Málaga -- Rafael Almirón Santa Bárbara ("You") and Wolters Kluwer Health, Inc. ("Wolters Kluwer Health, Inc.") consists of your license details and the terms and conditions provided by Wolters Kluwer Health, Inc. and Copyright Clearance Center.

License Number	5485820788451
License date	Feb 11, 2023
Licensed Content Publisher	Wolters Kluwer Health, Inc.
Licensed Content Publication	Journal of Bone & Joint Surgery
Licensed Content Title	Displaced Proximal Humeral Fractures: PART I. CLASSIFICATION AND EVALUATION
Licensed Content Author	CHARLES S. NEER
Licensed Content Date	Sep 1, 1970
Licensed Content Volume	52
Licensed Content Issue	6
Type of Use	Dissertation/Thesis
Requestor type	University/College
Sponsorship	No Sponsorship
Format	Print and electronic
Will this be posted online?	Yes, on a secure website
Portion	Figures/tables/illustrations
Number of figures/tables/illustrations	1
Author of this Wolters Kluwer article	No
Will you be translating?	Yes
Number of languages	1
Intend to modify/change the content	No
Title	Thesis: Evaluación de las nuevas tecnologías en 3D en la planificación quirúrgica de fracturas de húmero proximal en Cirugía Ortopédica y Traumatología. Comparación entre impresión en 3D y Realidad Virtual
Institution name	Universidad de Málaga
Expected presentation date	Jun 2023
Order reference number	1
Portions	I need the figure of the classic image drawn by Neer of his classification of the proximal humerus fractures
Specific Languages	Spanish
Requestor Location	University of Málaga  Attn: University of Málaga
Publisher Tax ID	EU826013006
Total	0.00 EUR
Terms and Conditions	

13/3/23, 10:05

RightsLink Printable License

ELSEVIER LICENSE  
TERMS AND CONDITIONS

Mar 13, 2023


---

This Agreement between University of Málaga -- Rafael Almirón Santa Bárbara ("You") and Elsevier ("Elsevier") consists of your license details and the terms and conditions provided by Elsevier and Copyright Clearance Center.

License Number	5507161281038
License date	Mar 13, 2023
Licensed Content Publisher	Elsevier
Licensed Content Publication	Journal of Shoulder and Elbow Surgery
Licensed Content Title	Predictors of humeral head ischemia after intracapsular fracture of the proximal humerus
Licensed Content Author	R Hertel,A Hempfing,M Stiehler,M Leunig
Licensed Content Date	July–August 2004
Licensed Content Volume	13
Licensed Content Issue	4
Licensed Content Pages	7
Start Page	427
End Page	433
Type of Use	reuse in a thesis/dissertation
Portion	figures/tables/illustrations

13/3/23, 19:05

RightsLink Printable License

Number of figures/tables/illustrations	1
Format	both print and electronic
Are you the author of this Elsevier article?	No
Will you be translating?	Yes, without English rights
Number of languages	1
Title	Thesis: Evaluación de las nuevas tecnologías en 3D en la planificación quirúrgica de fracturas de húmero proximal en Cirugía Ortopédica y Traumatología. Comparación entre impresión en 3D y Realidad Virtual
Institution name	Universidad de Málaga
Expected presentation date	Jun 2023
Order reference number	Figure 1
Portions	Figure 1. Binary (LEGO) description system.
Specific Languages	Spanish
Requestor Location	 Attn: University of Málaga
Publisher Tax ID	GB 494 6272 12
Total	0.00 EUR
Terms and Conditions	

31/3/23, 21:19

RightsLink - Your Account

## WOLTERS KLUWER HEALTH, INC. LICENSE TERMS AND CONDITIONS


Mar 31, 2023

This Agreement between University of Málaga – Rafael Almirón Santa Bárbara ("You") and Wolters Kluwer Health, Inc. ("Wolters Kluwer Health, Inc.") consists of your license details and the terms and conditions provided by Wolters Kluwer Health, Inc. and Copyright Clearance Center.

The publisher has provided special terms related to this request that can be found at the end of the Publisher's Terms and Conditions.

License Number	5519410746427
License date	Mar 31, 2023
Licensed Content Publisher	Wolters Kluwer Health, Inc.
Licensed Content Publication	Journal of Orthopaedic Trauma
Licensed Content Title	Humerus
Licensed Content Author	
Licensed Content Date	Jan 1, 2018
Licensed Content Volume	32
Type of Use	Dissertation/Thesis
Requestor type	University/College
Sponsorship	No Sponsorship
Format	Print and electronic
Will this be posted online?	Yes, on a secure website
Portion	Figures/tables/illustrations
Number of figures/tables/illustrations	3
Author of this Wolters Kluwer article	No
Will you be translating?	Yes
Number of languages	1
Intend to modify/change the content	No
Title	Thesis: Evaluación de las nuevas tecnologías en 3D en la planificación quirúrgica de fracturas de húmero proximal en Cirugía Ortopédica y Traumatología. Comparación entre impresión en 3D y Realidad Virtual
Institution name	Universidad de Málaga
Expected presentation date	Jun 2023
Order reference number	AO-Surgery Humerus Classification 2018
Portions	Figure of the humerus classification that occupies from S11 to S14
Specific Languages	Spanish
Requestor Location	University of Málaga
	Attn: University of Málaga
Publisher Tax ID	EU826013006
Billing Type	Invoice

## VIII.5. Certificado del comité ético



Servicio Andaluz de Salud  
CONSEJERÍA DE SALUD

*Comité de Ética de la Investigación Provincial de Málaga*

Dra. Dña. Gloria Luque Fernández, Secretaria del CEI Provincial de Málaga


CERTIFICA:

Que en la sesión de CEI de fecha: 24/02/2022 ha evaluado la propuesta de D/Dña.: Rafael Almirón Santa Bárbara, referido al proyecto de Investigación: "Nuevas tecnologías 3D en la interpretación de fracturas de húmero proximal durante la formación sanitaria en Cirugía Ortopédica y Traumatología: Estudio de concordancia interobservador".

Este Comité lo considera ética y metodológicamente correcto.

La composición del CEI en esta sesión es la siguiente:

- Dra. Ana Alonso Torres (UGC Neurociencias)
- Dra. M<sup>a</sup> Victoria de la Torre Prados (UMA)
- Dr. José Leiva Fernández (Médico Familia)
- Dr. Jesús López del Peral (Esp. Protec. Datos)
- Dr. Rafael Carvia Ponsaille (Anatomía Patológica)
- Dra. M<sup>a</sup> Angeles Rosado Souvirón (UGC Farmacia)
- Dra. M<sup>a</sup> Dolores López Carmona (Medicina Interna)
- Dra. Cristobalina Mayorga Mayorga (Laboratorio)
- Dña. Carmen López Gálvez del Postigo (Miembro Lego)
- Dra. Gloria Luque Fernández (Investigación)
- Dr. Juan Carlos Navarro Barrios (Psiquiatría, Centro de Salud El)
- Dr. José C. Fernández García (UGC Endocrinología y Nutrición)
- Dra. Marta Blasco Alonso (Obst. y Ginecología)
- Dr. Manuel Herrera Gutiérrez (UGC UCI)
- Dra. Encarnación Blanco Reina (Farmacología Clínica)
- D<sup>a</sup>. Ana Díaz Ruiz (Licenciada en Derecho)
- Dra. M<sup>a</sup> Carmen Vela Márquez (Farmacéutica Distrito)
- Dr. Antonio López Téllez (Médico de Familia)



---

Málaga, a 15 de marzo de 2022

Fdo.: Dra. Gloria Luque Fernández  
Secretaria del CEI

### **VIII.6. Conflictos de interés**

El autor principal de la presente tesis, así como el tutor/director y el resto de participantes que han tomado parte en el desarrollo de la misma, declaran no tener conflictos de interés.

### **VIII.7. Colaboradores del trabajo y agradecimientos**

Este trabajo no hubiera sido posible sin la ayuda altruista e inestimable de todos los residentes de cirugía ortopédica que participaron en este estudio cumplimentando los cuestionarios (Hospital Virgen de las Nieves, Granada España; Hospital Virgen de la Victoria, Málaga, España; Hospital de Antequera, Málaga, España).

Es necesario también agradecer de nuevo la ayuda brindada a nuestro Comité de Expertos (R.L. Egozcue-Folgueras, A. López-García y A. López-Camacho).

Por último, agradecer de nuevo al resto de coautores del trabajo, uno de ellos tutor y director de la presente tesis: Francisco García Rivera, Maurice Lamb, Rodrigo Víquez Da Silva y Mario Gutiérrez Bedmar.

Sin la colaboración directa de todos los anteriores, el artículo original y la presente tesis nunca hubieran sido posibles. Gracias.