



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TRABAJO FINAL DE GRADO

Grado en Ingeniería mecánica

**ALCANCE Y OPTIMIZACIÓN DE PROTOTIPOS  
ELABORADOS A TRAVÉS DE LA FABRICACIÓN ADITIVA EN  
CASOS QUIRÚRGICOS**



**Memoria**

**Autor:** Kevin Alexander Pérez Cedeño  
**Director:** José Antonio Travieso Rodríguez  
**Departamento** EM  
**Co-Directora:** Bàrbara Adrover Monserrat  
**Convocatoria:** junio 2022

## **RESUMEN**

En el siguiente proyecto se detallarán cinco casos quirúrgicos. En cada caso se buscará optimizar los archivos STL originales y hallar una configuración de parámetros de impresión que permita imprimir los prototipos ahorrando la mayor cantidad de tiempo y material.

Los materiales que se utilizarán serán PLA y ABS. Materiales muy distintos entre sí. Siendo el ABS más delicado y susceptible a la diferencia de temperatura ambiental. El motivo es encontrar parámetros de impresión óptimos para ambos materiales.

Adicionalmente se plantearán soluciones para los distintos problemas de impresión que puedan surgir por la complejidad de cada caso clínico. También se usarán dos modelos de impresoras. Ya que se requiere extrusión doble y extrusión con un solo extrusor.

Se obtendrán, de este modo, valores y parámetros recomendados según el material con el que se desee imprimir.

Seguidamente se hará un análisis del alcance que tienen los prototipos fabricados en los casos quirúrgicos. Posteriormente se elaborará el análisis económico de cada pieza, la factibilidad medioambiental del proyecto y finalmente las conclusiones.

## **ABSTRACT**

In the following project, five surgical cases will be detailed. In each case, the original STL files will be optimized and configuration of printing parameters that allows printing the prototypes saving the greatest amount of time and material will be find.

The materials to be used will be PLA and ABS. Which are very different materials. ABS being more delicate and susceptible to the difference in environmental temperature. The reason is to find optimal printing parameters for both materials.

Additionally, solutions will be proposed for the different printing problems that may arise due to the complexity of each clinical case. Two models of printers will also be used. As double extrusion might be required in some of the cases.

In this way, recommended values and parameters will be obtained according to the material with which the user wants to print.

Next, an analysis will be made of the scope of the prototypes manufactured in surgical cases. Subsequently, the economic analysis of each piece, the environmental feasibility of the project and finally the conclusions will be elaborated.

# **TABLA DE CONTENIDOS**

Resumen.....	2
Abstract.....	3
Índice De Ilustraciones .....	6
Índice De Tablas.....	9
1. Introducción .....	10
1.1 Objetivos .....	10
1.2 Motivación.....	10
1.3 Justificación De La Utilidad .....	10
1.4 Alcance .....	10
1.5 Requerimientos.....	10
2. Estado Del Arte .....	12
2.1 Situación De La Impresión 3d En La Actualidad.....	12
2.2 Una Mirada Al Futuro.....	21
2.3 Peligros .....	23
2.4 Métodos De Fabricación Aditiva.....	24
3. Descripción De Los Experimentos .....	27
3.1 Origen De Casos Clínicos .....	27
3.2 Archivos Necesarios Para Imprimir .....	27
3.3 Calibración De La Impresora.....	29
3.4 Principales Parámetros De Impresión.....	30
3.5 Solución De Errores Ordinarios.....	38
4. Casos De Estudio.....	44
4.1 Riñones.....	44
4.1.1 Primera Versión .....	46
4.1.2 Parámetros De Impresión .....	47
4.2 Aorta Abdominal .....	48
4.2.1 Primera Versión .....	48
4.2.2 Versión Final .....	49
4.2.3 Parámetros De Impresión .....	49
4.3 Cráneo .....	50
4.3.1 Primera Versión .....	51
4.3.2 Versión Final .....	52

4.3.3 Comparativa De Parámetros De Impresión .....	53
4.4 Vértebras.....	54
4.4.1 Primera Versión .....	54
4.4.2 Versión Final .....	55
4.4.3 Comparativa De Parámetros De Impresión .....	55
4.5 Tumor En Pulmón.....	56
4.5.1 Primera Versión .....	58
4.5.2 Versión Final .....	59
4.5.3 Parámetros De Impresión .....	60
4.6 Discusión.....	61
4.6.1 Comparación De Impresoras.....	63
4.6.2 Alcance De Los Casos De Estudio.....	64
5. Factibilidad Medioambiental.....	65
5.1 Impacto Ambiental .....	66
6. Conclusiones .....	67
7. Presupuesto.....	69
7.1 Costo De Recursos Humanos .....	69
7.2 Costo De Software.....	69
7.3 Costo De Material .....	70
7.4 Costo De Maquinaria .....	70
7.5 Costo Energético .....	70
7.6 Costo De Depreciación.....	71
7.7 Costo Total Del Proyecto.....	72
8. Bibliografía.....	73

## **ÍNDICE DE ILUSTRACIONES**

Ilustración 1. Nave Industrial Modelada Con Revit. (Domínguez, Romero, Espinosa, & Domínguez, 2013) .....	13
Ilustración 2. Nave Industrial Prototipada Con V-Fash. (Domínguez, Romero, Espinosa, & Domínguez, 2013) .....	13
Ilustración 3. Diseño De Proyecto De Mercado. (Domínguez, Romero, Espinosa, & Domínguez, 2013) .....	13
Ilustración 4. Proyecto De Mercado Hecho Con Impresora Projet 1500. (Domínguez, Romero, Espinosa, & Domínguez, 2013) .....	14
Ilustración 5. Autoridades Usando Visores De Protección Facial. (Varela Aldás, 2020) .....	14
Ilustración 6. Prótesis Impresa Por Alumnos De La EEBE. ....	15
Ilustración 7. Archivo STL De Los Dedos De La Prótesis. (Gyrobot, 2014) .....	15
Ilustración 8. Archivo STL De La Palma De La Mano De La Prótesis. (Gyrobot, 2014) .....	16
Ilustración 9. Corte Transversal Del Tercio Inferior Del Brazo Plastinado Con Silicona (Izquierda) Y La Réplica Realizada Con La Impresora Projet660 Pro (Derecha). Barra=2cm. (Inzunza, Y Otros, 2015) .....	17
Ilustración 10. Corte De Abdomen Seccionado En Fresco (Izquierda) Y Réplica En Impresión 3D (Derecha). Barra=2cm. (Inzunza, Y Otros, 2015) .....	17
Ilustración 11. Réplica Del Segmento Lumbar De La Columna Vertebral, Obtenida Con El Equipo Projet 5500X (Arriba). Barra=2cm. (Inzunza, Y Otros, 2015) .....	17
Ilustración 12. Impresión De Un Embrión De Rata. (Inzunza, Y Otros, 2015).....	18
Ilustración 13. Aplicación En COT. A) Planificación Preoperatoria. B) Premoldeado De Placas. C) Ayuda Intraoperatoria. D) Esterilizado Para Uso Quirúrgico. E) Comunicación Médico-Paciente. F) Formación Médica. (Andrés Cano, 2021).....	19
Ilustración 14. Ejemplo De Guía Quirúrgica Paciente-Específica. A) Modelo CAD Y Planificación Virtual. B) Modelo CAD De La Guía Quirúrgica. C) Intervención Con Guía Quirúrgica Paciente-Específica. (Andrés Cano, 2021) .....	20
Ilustración 15. Órtesis De Muñeca Fabricada Con I3D. A) Renderizado Virtual. B) Modelo CAD. C) Impresión 3D Con Material PLA. D) Aplicación Correcta De Órtesis. (Andrés Cano, 2021) .....	21
Ilustración 16. Proceso De Colocación De Esferoides Capa Por Capa A Través De La Bioimpresora. (Cernevale, 2010) .....	21
Ilustración 17. Red De Vasos Sanguíneos Impresos. (Cernevale, 2010).....	22
Ilustración 18. Tecnologías De Impresión 3D. (Quemada Villagómez, Alcaraz Caracheo, Ruíz Mondragón, & Rodríguez Castro, 2017) .....	25
Ilustración 19. Proceso Del Modelado Por Deposición Fundida. (Quemada Villagómez, Alcaraz Caracheo, Ruíz Mondragón, & Rodríguez Castro, 2017) .....	25
Ilustración 20. Proceso De Sinterización Por Láser Selectiva. (Quemada Villagómez, Alcaraz Caracheo, Ruíz Mondragón, & Rodríguez Castro, 2017) .....	26
Ilustración 21. Esquema De Impresión 3D Por Estereolitografía. (Quemada Villagómez, Alcaraz Caracheo, Ruíz Mondragón, & Rodríguez Castro, 2017) .....	26

Ilustración 22. Hospital Clínico Quirúrgico "Hermanos Almeijeiras". (RADIO REBELDE, 2022).....	27
Ilustración 23. Interfaz Autodesk Meshmixer.....	28
Ilustración 24. Interfaz Ultimaker Cura.....	28
Ilustración 25. Entrada De Tarjeta. ....	29
Ilustración 26. Altura Ideal De La Boquilla. (Impresoras 3D, 2020) .....	29
Ilustración 27. Posición De Origen En Impresora Ender 3.....	30
Ilustración 28. Calibración Del Primer Vértice De La Cama.....	30
Ilustración 29. Guía De Colores Al Momento De Configurar La Impresión En Ultimaker Cura. ....	31
Ilustración 30. Comparación Entre Una Altura De Capa Gruesa (Izquierda) Y Una Más Fina (Derecha). (Día De La Toalla, 2021).....	31
Ilustración 31. A) Grosor De Pared 0.4mm. B) Grosor De Pared 1.2mm. C) Grosor De Pared 2mm. ....	32
Ilustración 32. Alineación De Costuras En Z Ubicadas En Una Coordenada Específica (Izquierda) Y Costuras Ubicadas Al Azar (Derecha). (Día De La Toalla, 2021).....	32
Ilustración 33. A) Patrón De Relleno Líneas Y Densidad De Relleno 0.8%. B) Patrón De Relleno Líneas Y Densidad De Relleno 90%.....	32
Ilustración 34. A) Patrón De Relleno Cúbico Bitrucado Y Densidad De Relleno 20%. B) Patrón De Relleno Zigzag Y Densidad De Relleno 20%. C) Patrón De Relleno Cruz Y Densidad De Relleno 20%. D) Patrón De Relleno Concéntrico Y Densidad De Relleno 20%.....	33
Ilustración 35. Placa De Impresión De La Impresora Ender 3. (Ikkaro, 2022).....	33
Ilustración 36. Fujo Recomendado (Izquierda) Y Escasez De Flujo (Derecha). (Día De La Toalla, 2021).....	34
Ilustración 37. Sistema De Referencia En Ultimaker Cura, Azul (Z), Verde (Y) Y Rojo (X). ....	35
Ilustración 38. Beneficio De Activar La Retroacción. (ALL3DP, 2022) .....	35
Ilustración 39. Estructura Sin Soporte (Izquierda) Y Estructura Con Soporte (Derecha). ....	35
Ilustración 40. Estructura De Soporte Normal (Izquierda) Y Estructura De Soporte Árbol (Derecha). ....	36
Ilustración 41. Patrón De Soporte Tipo Línea.....	36
Ilustración 42. A) Distancia De Línea De Soporte 8mm. B) Distancia De Línea De Soporte 15mm. C) Distancia De Línea De Soporte 30mm. ....	37
Ilustración 43. A) Adherencia Tipo Falda. B) Adherencia Tipo Borde. C) Adherencia Tipo Balsa. D) Sin Ningún Tipo De Adherencia.....	38
Ilustración 44. Escasez De Filamento En La Extrusión. (Leon3D, 2022) .....	38
Ilustración 45. Defectos En La Impresión Por Poco Plástico. (Leon3D, 2022).....	39
Ilustración 46. Falta De Adherencia En La Cama De Impresión. (Leon3D, 2022) .....	39
Ilustración 47. Hilos En Consecuencia De No Habilitar La Retroacción. (Leon3D, 2022) .....	40
Ilustración 48. Deformación De Impresión Por Sobrecalentamiento. (Leon3D, 2022). 40	
Ilustración 49. Sistema De Refrigeración En Impresora Ender 3. (Inovamarket, 2022)40	
Ilustración 50. Desplazamiento De Capas Durante La Extrusión. (Leon3D, 2022).....	41

Ilustración 51. Patrón De Relleno Impreso Correctamente (Izquierda) Y Patrón De Relleno Deficiente (Derecha). (Leon3D, 2022).....	41
Ilustración 52. Leve Desplazamiento En Las Capas (Izquierda) E Impresión Ideal (Derecha). (Leon3D, 2022) .....	42
Ilustración 53. Separación De Capas. (Leon3D, 2022) .....	42
Ilustración 54. Warping. (Craftcloud, 2022) .....	43
Ilustración 55. Cracking. (3Dmarket, 2022) .....	43
Ilustración 56. Archivo STL Original De Los Riñones Desde Distintos Ángulos.....	44
Ilustración 57. Tiempo Necesario Para Imprimir Los Riñones A Una Escala Del 50%. 45	
Ilustración 58. Estructuras Internas Que Se Aprecian Después De Realizar Un Corte En Meshmixer.....	45
Ilustración 59. Archivo STL Luego De Modificarlo En Meshmixer. ....	45
Ilustración 60. A) Riñones Impresos De Una Sola Donde Se Puede Apreciar El Amplio Uso De Soportes. B) Riñones Impresos En 4 Partes.....	46
Ilustración 61. Riñones Impresos De Una Sola (Izquierda) Y Riñones Impresos Por Separado Y Luego Unidos Por Super Glue (Derecha).....	46
Ilustración 62. Archivo STL Original De La Aorta Abdominal.....	48
Ilustración 63. Desplazamiento De Capas Durante La Impresión. ....	48
Ilustración 64. Aorta Abdominal Con Adherencia Tipo Falda (Izquierda) Y Aorta Abdominal Con Adherencia Tipo Borde (Derecha). ....	49
Ilustración 65. Aorta Abdominal Impresa. ....	49
Ilustración 66. Archivo STL Original Del Cráneo. ....	50
Ilustración 67. Archivo STL Luego De Modificarlo En Meshmixer. ....	51
Ilustración 68. Primer Intento Desde Distintos Ángulos, No Se Usó La Retroacción... 52	
Ilustración 69. Segundo Intento, Se Usó La Retroacción, Pero Las Capas No Terminaban De Unirse. ....	52
Ilustración 70. Tercer Intento, Con Una Menor Altura De Capa, Menor Velocidad De Impresión, Menor Escala Y Habilitando La Retroacción. ....	53
Ilustración 71. Archivo STL Original De Las Vértebras. ....	54
Ilustración 72. Primer Intento Desde Distintos Ángulos. Se Aprecian Muchas Marcas Donde Antes Se Ubicaban Los Soportes. ....	55
Ilustración 73. Segundo Intento De Impresión Con Una Mejor Configuración De Soportes.....	55
Ilustración 74. Aplicación De La Doble Extrusión.....	57
Ilustración 75. Impresora BCN3D Sigma R19. ....	57
Ilustración 76. Archivo STL Original. Se Encierra El Tumor.....	57
Ilustración 77. STL Suavizado En Meshmixer. ....	58
Ilustración 78. Distinción De Las Partes A Imprimir. ....	58
Ilustración 79. Comando Para Combinar Las Piezas.....	59
Ilustración 80. Piezas Combinadas. Se Puede Diferenciar Los Materiales Por La Leve Diferencia De Colores. ....	59
Ilustración 81. Impresión De Prueba Con ABS De Distintos Colores.....	60
Ilustración 82. Impresión STL Suavizado (Izquierda) E Impresión STL Original (Derecha).....	60
Ilustración 83. Impresión En Serie. (GOVAJU 3D Printing, 2022) .....	63

## **ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Parámetros De Impresión De Los Riñones.....	47
Tabla 2. Parámetros De Impresión De La Aorta Abdominal.....	49
Tabla 3. Parámetros De Impresión Para Los Distintos Intentos Del Cráneo.....	53
Tabla 4. Parámetros De Impresión Para Los Distintos Intentos De Las Vértebras.....	56
Tabla 5. Parámetros De Impresión Para El Tumor En Pulmón.....	60
Tabla 6. Consumo Eléctrico Para Realizar El Proyecto.....	66
Tabla 7. Costo De Recursos Humanos.....	69
Tabla 8. Costo De Software.....	69
Tabla 9. Costo De Material.....	70
Tabla 10. Costo De Maquinaria.....	70
Tabla 11. Coste De Electricidad.....	71
Tabla 12. Coste De Depreciación.....	72
Tabla 13. Costo Total Del Proyecto.....	72

# **1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1 OBJETIVOS**

El objetivo principal de este trabajo de fin de grado es la optimización del proceso de impresión 3D de objetos obtenidos a partir de archivos DICOM. La calidad de la impresión debe ir acorde a los intereses y necesidades de los médicos, por lo tanto, siempre se intentará minimizar los costes variando parámetros de impresión de manera eficiente y sin descuidar los intereses médicos.

El objetivo secundario va ligado a estudiar la posibilidad de fabricar diferentes elementos del cuerpo humano a través de la tecnología de fabricación aditiva con el fin de asistir a los cirujanos antes de una operación para ahorrar tiempo y dinero.

## **1.2 MOTIVACIÓN**

La motivación para desarrollar este proyecto nace de la idea de las bioimpresoras, las cuales crean órganos a partir de células madre y plástico biodegradable.

Lo que se pretende es dar un enfoque distinto a este tema, y mediante el estudio de la impresión 3D junto a sus beneficios poder replicar órganos, tejidos, huesos y vasos sanguíneos de casos clínicos reales que puedan ser de apoyo antes de una intervención quirúrgica utilizando materiales tipo PLA y ABS.

## **1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA UTILIDAD**

El motivo por el que se escogió este proyecto de investigación es en la medida de lo posible facilitar el trabajo de los cirujanos ya sea ahorrando tiempo en la operación, disminuyendo el periodo de recuperación de los pacientes o incluso rebajando la ocupación de camas en el centro médico.

## **1.4 ALCANCE**

Con la finalidad de cumplir los objetivos del proyecto se usarán las siguientes pautas como guía: Primero se realizará la exposición de casos clínicos reales junto con los materiales con los que se imprimirá. Luego se explicará la obtención del modelado 3D para cada prototipo a imprimir. Seguidamente se explicarán los parámetros de impresión junto con las mejoras hechas en cada prototipo. Posteriormente se hablará sobre la participación de los prototipos en los casos clínicos. Después se calculará el coste del proyecto. Finalmente se realizará la discusión y conclusiones del proyecto.

## **1.5 REQUERIMIENTOS**

Para llevar a cabo este proyecto se han tomado en cuenta los siguientes requerimientos:

- Casos clínicos.
- Diseños de piezas a fabricar.

## **2. ESTADO DEL ARTE**

La impresión 3D es una tecnología de fabricación por adición con el cual se crea un objeto tridimensional a través de la superposición de capas continuas de material fundido para después solidificarse. Los inicios de esta tecnología aparecen en el año de 1981 cuando Hideo Kodama, investigador del Instituto Municipal de Investigación Industrial de Nagoya Japón publica una reseña sobre un modelo sólido fabricado mediante un sistema de prototipado rápido de fotopolímero (Bucco, 2016).

Desde este acontecimiento la fabricación aditiva ha ido evolucionando desde la creación de simples figuras como adornos hasta metas más ambiciosas como el diseño de órganos operativos para ser usados en un trasplante quirúrgico en el futuro.

### **2.1 SITUACIÓN DE LA IMPRESIÓN 3D EN LA ACTUALIDAD**

Al ser posible el diseño y fabricación de infinidad de geometrías la fabricación aditiva puede ser útil en gran variedad de casos como la arquitectura, medicina, docencia, investigación, diseño e incluso servir como un apoyo para afrontar la pandemia del coronavirus.

A continuación, se describirán algunas de las aplicaciones de la impresión 3D en la actualidad.

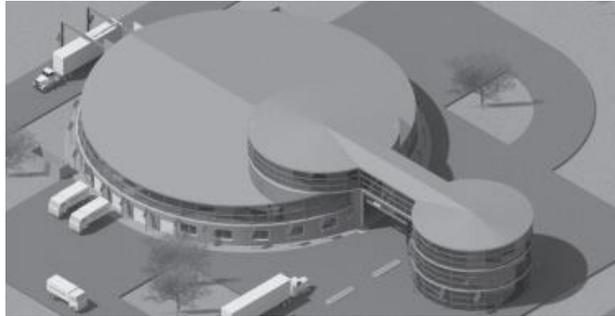
#### **Arquitectura**

Hoy por hoy se está estudiando la factibilidad de imprimir maquetas y prototipos en arquitectura y construcción. A nivel técnico el principal objetivo de hacer una maqueta es funcional, esto quiere decir que el prototipo pueda servir a los técnicos para planificar el trabajo, distribuir volúmenes y hallar futuros conflictos que puedan aparecer durante la construcción de la obra (Domínguez, Romero, Espinosa, & Domínguez, 2013).

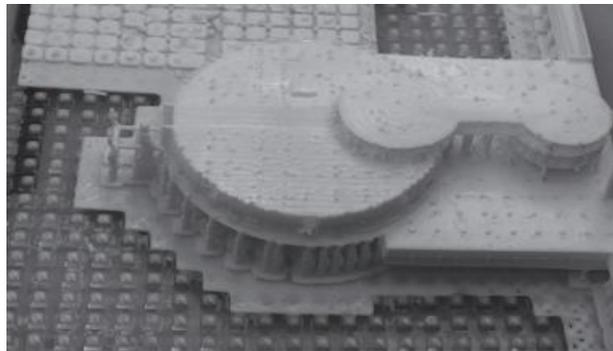
La impresión 3D es muy útil en este aspecto ya que encontrando una correlación entre el material real y el material de la maqueta se puede verificar el correcto funcionamiento de una estructura metálica, su distribución de fuerzas en vigas y la capacidad que tiene la obra para soportar los esfuerzos a los que está sometida, incluso con la correlación entre la respuesta del material real y el material de maqueta y tomando en cuenta el cambio de escala es posible ejecutar ensayos preliminares de tormentas, fuertes vientos, eventos sísmicos, entre otros. No obstante, los ejemplos mencionados anteriormente aún no se implementan en un estudio profesional, pero no dejan de ser posibles (Domínguez, Romero, Espinosa, & Domínguez, 2013).

En contraste con los beneficios funcionales en la arquitectura de la impresión 3D está el apartado estético, donde no se puede lograr tanto lujo de detalle (Ilustración 1-4), y en las maquetas para clientes es justo lo que se busca, siendo

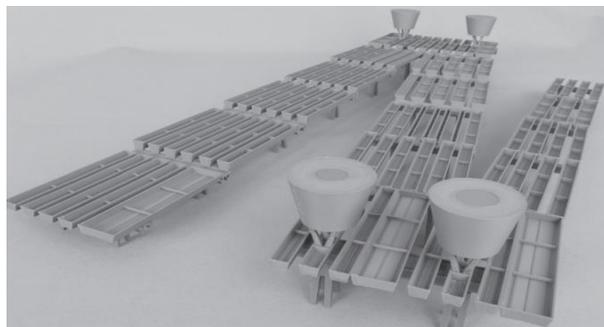
este su principal problema, además en muchas estructuras hacen falta soportes que luego deben ser quitados, pero suelen dejar una huella. Otro problema es la escala, por ejemplo, si hay un muro real con un grosor de 500 mm y se lo representa a una escala 1:250 el muro en la maqueta sería de 2 mm, grosor que se puede obtener en la mayoría de impresoras, pero qué pasaría si se cambia la escala a 1:500 en ese entonces el grosor de la entidad debería ser de 0.3 mm, dimensión que no se puede conseguir con facilidad ni en la impresora más potente actualmente (Domínguez, Romero, Espinosa, & Domínguez, 2013).



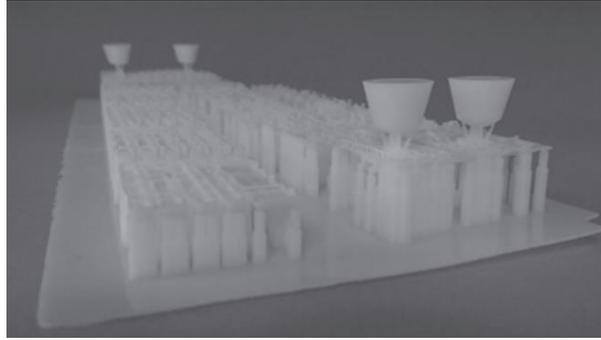
*Ilustración 1. Nave industrial modelada con Revit. (Domínguez, Romero, Espinosa, & Domínguez, 2013)*



*Ilustración 2. Nave industrial prototipada con V-Fash. (Domínguez, Romero, Espinosa, & Domínguez, 2013)*



*Ilustración 3. Diseño de proyecto de mercado. (Domínguez, Romero, Espinosa, & Domínguez, 2013)*



*Ilustración 4. Proyecto de mercado hecho con impresora Projet 1500. (Domínguez, Romero, Espinosa, & Domínguez, 2013)*

## **Impresión 3D y COVID**

Durante los momentos más críticos de la pandemia y escasez de mascarillas, la Universidad Tecnológica Indoamericana ubicada en Ecuador elaboró visores de protección facial usando la fabricación aditiva con combustibles básicos como ABS o PLA (Ilustración 5), la ventaja de estos equipos además de ser muy baratos con un precio por unidad aproximado de US\$ 1.125 eran sus bajos tiempos de producción por lo que permitieron dar respuesta oportuna a médicos y policías de la provincia de Tungurahua (Ecuador). Adicionalmente, a diferencia de las mascarillas los visores son reutilizables dado que se pueden esterilizar con procesos químicos para usarlos de nuevo. Este proyecto mejoró en gran medida las condiciones de trabajo de los profesionales mencionados anteriormente (Varela Aldás, 2020).



*Ilustración 5. Autoridades usando visores de protección facial. (Varela Aldás, 2020)*

## **Prótesis a bajo costo**

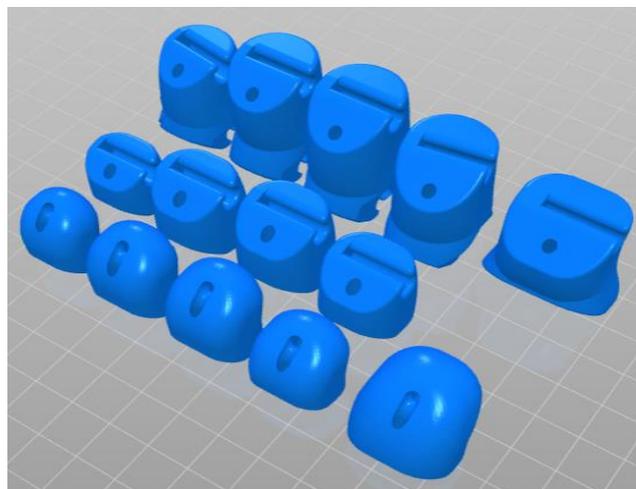
Un factor que impulsa el crecimiento de las tecnologías de fabricación aditiva es que muchos de los softwares con los que se trabaja son de código abierto y que actualmente el internet permite el intercambio de información de forma rápida.

Un claro ejemplo de estos acontecimientos es Thingiverse, plataforma digital donde se pueden encontrar prótesis de manos y piernas, gratuitas para su reproducción y modificación, en esta página web se hallan archivos STL editables (Ilustración 7-8), con esto cualquier persona en cualquier parte del

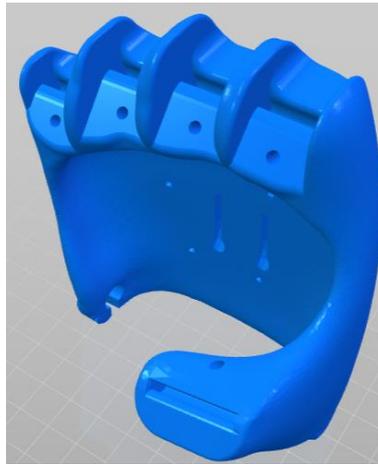
mundo con un poco de conocimiento en la materia podría fabricarse una prótesis a su medida y a un muy bajo costo. Sin ir tan lejos el cuatrimestre pasado los alumnos de fabricación aditiva del campus EEBE construyeron una prótesis de mano como proyecto final (Ilustración 6).



*Ilustración 6. Prótesis impresa por alumnos de la EEBE.*



*Ilustración 7. Archivo STL de los dedos de la prótesis. (Gyrobot, 2014)*



*Ilustración 8. Archivo STL de la palma de la mano de la prótesis. (Gyrobot, 2014)*

### **Docencia anatómica**

La Facultad de Medicina de la Pontificia Universidad Católica de Chile ante las dificultades de acceso a material cadavérico en el país se vio obligada a desarrollar métodos de impresión 3D, lo que se buscaba replicar eran 2 secciones transversales de cadáveres humanos: *“una sección plastinada del tercio distal del brazo; una sección fresca abdominal; un segmento de columna lumbar junto con su aorta abdominal y un embrión de rata”* (Inzunza, y otros, 2015).

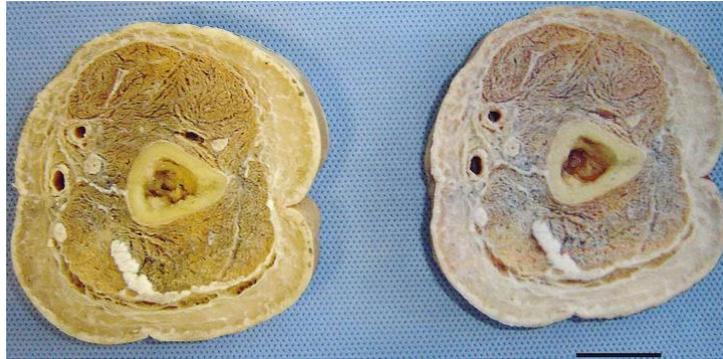
Se escaneó la superficie de la sección del brazo y de la sección abdominal con el equipo Go!Scan 3D de la firma Creaform, posteriormente se fotografiaron sus caras proximal y distal con una cámara Nikon D7000, también se realizaron múltiples fotografías con 52 cámaras digitales, por consiguiente, la reconstrucción tridimensional se la llevó a cabo en el software Agisoft PhotoScan y finalmente se retocó el archivo STL con el software Meshmixer.

Por otro lado, la parte lumbar fue adquirida con una Tomografía Axial Computarizada y procesada en el programa Mimic' s de Materialise.

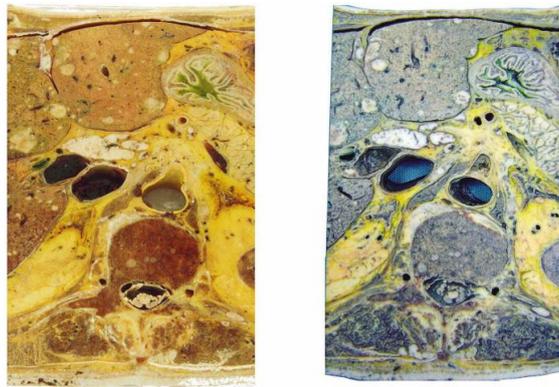
Por último, para tener la representación del embrión, se obtuvieron imágenes con el equipo Optical Projection Tomography, luego se reconstruyó el archivo 3D mediante el software Mimic' s.

Los resultados de la fabricación aditiva sobrepasaron las creencias, es innegable que un sólido conocimiento de la anatomía solo se puede lograr con horas de prácticas con material cadavérico, son estas horas las que garantizan el desempeño impecable de futuros profesionales, puesto que solo así es posible verificar empíricamente órganos enfermos o causas de muerte, no obstante, ante la problemática acontecida en Chile la fabricación aditiva brindó un gran soporte a la docencia anatómica y abre las puertas a futuros avances (Inzunza, y otros, 2015).

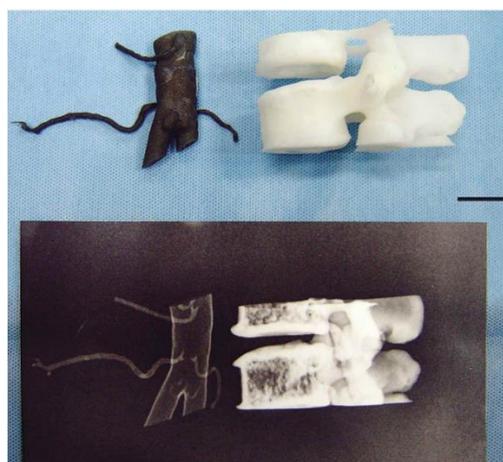
Como es posible apreciar desde la ilustración 9 hasta la ilustración 12 mediante la fabricación aditiva es posible conservar la topografía, proporcionalidad volumétrica, textura y definición copiando fielmente los detalles de las secciones originales son embargo se puede distinguir una caída de color como en las ilustraciones 9 y 10.



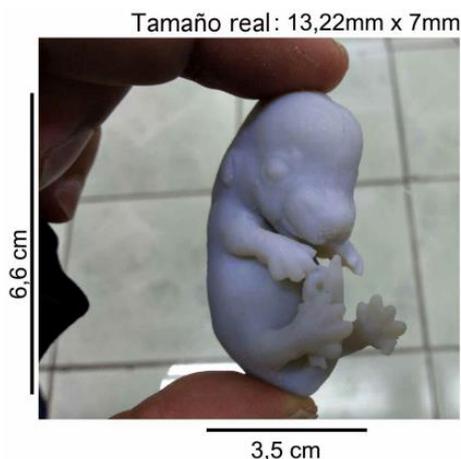
*Ilustración 9. Corte transversal del tercio inferior del brazo plastinado con silicona (izquierda) y la réplica realizada con la impresora ProJet660 Pro (derecha). Barra=2cm. (Inzunza, y otros, 2015)*



*Ilustración 10. Corte de abdomen seccionado en fresco (izquierda) y réplica en impresión 3D (derecha). Barra=2cm. (Inzunza, y otros, 2015)*



*Ilustración 11. Réplica del segmento lumbar de la columna vertebral, obtenida con el equipo Projet 5500X (arriba). Barra=2cm. (Inzunza, y otros, 2015)*



*Ilustración 12. Impresión de un embrión de rata. (Inzunza, y otros, 2015)*

Los ejemplos antes citados son solo unos pocos de la gran variedad de casos donde se puede apreciar el alcance de la impresión 3D. Es interesante ser testigo de cómo un movimiento que surgió con aficionados intentando elaborar alguna fruslería está cambiando al mundo.

### **Biocompatibilidad**

No solo es de interés que el material termoplástico sirva en la docencia anatómica. Si bien esta aplicación ayuda a tener una mejor visualización del problema quirúrgico pierde utilidad al momento de la intervención.

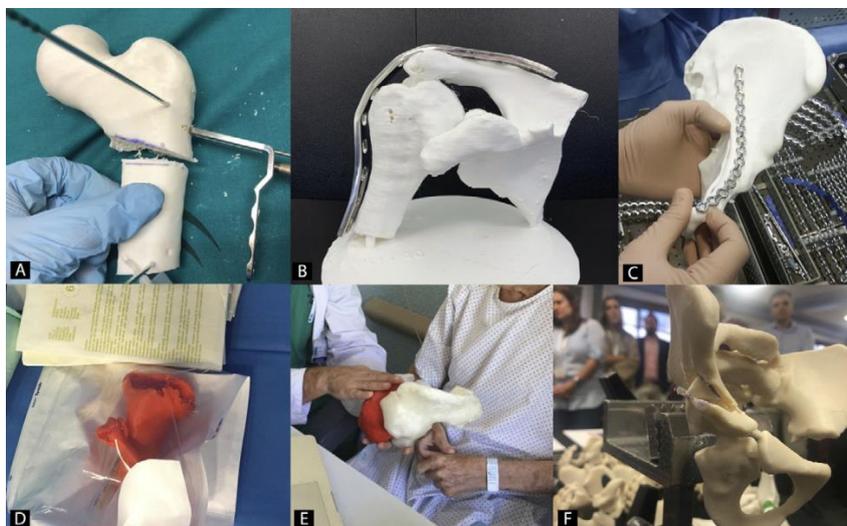
Actualmente se están desarrollando filamentos biocompatibles como lo es Bioflex® fabricado en Italia por Filoalfa. Material que pertenece al copoliéster-éter termoplástico grupo polimérico elastómero (TPC) con óxido de politrametileno (PTMO) como segmento blando. Mediante el estudio de citotoxicidad y siguiendo la norma ISO 10993:5 se ha comprobado que es biocompatible (Haryńska, 2020). Además, su extrusión a través de la impresión 3D no genera cambios en la estructura del filamento como lo puede ser la degradación. Su aplicación puede ser considerada en la ingeniería de huesos y cartílagos mediante implantes dado que es un material con una gran resistencia a la hidrólisis y ambientes agresivos (Haryńska, 2020). Entre parámetros recomendados para Bioflex® se puede considerar una temperatura de extrusión 210–240 °C, velocidad de impresión 40-60 mm/s y temperatura de la cama 0-70 °C (Haryńska, 2020). Asimismo, existe el enfoque de mejorar elastómeros termoplásticos como el PECUU que aún no es biocompatible, pero se pretende incrementar su hemo-compatibilidad y citotoxina (Basak, 2021).

El desarrollo de elastómero termoplásticos facilita emplear dichos materiales en distintas áreas biomédicas como lo son la ingeniería de tejidos, fabricación de estructuras vasculares eficientes y polímeros biocompatibles (Basak, 2021). El uretano termoplástico es ampliamente estudiado, se cree que en un futuro se podrá desarrollar vasos sanguíneos artificiales, corazones artificiales y andamios para la reproducción de la piel (Basak, 2021).

## **Cirugía ortopédica y traumatología**

Hay numerosas aplicaciones en la especialidad de cirugía ortopédica y traumatología. Estas pueden ser agrupadas en la fabricación: 1) biorréplicas o biomodelos, 2) implantes personalizados (*custom-made*), 3) herramientas a medida, 4) tejidos biocompatibles y 5) fármacos (Andrés Cano, 2021).

Los biomodelos son réplicas físicas de regiones anatómicas u órganos concretos del paciente. A través de imágenes médicas generadas en una tomografía computarizada (TC), resonancia magnética e incluso la ecografía y usando la impresión 3D (I3D) es posible reproducir físicamente cualquier región anatómica. Los biomodelos permiten al cirujano planificar las intervenciones quirúrgicas (Ilustración 13), tomar decisiones o simular la cirugía con anterioridad, incluso, hace más sencilla la comunicación con el paciente. Ejemplos de simulaciones técnicas médicas pueden ser intubaciones orotraqueales, suturas, endoscopías, intervenciones endovasculares, entre otras. La implementación de biorréplicas innova y mejora la educación médica, siendo una alternativa al uso de cadáveres para la enseñanza universitaria (Andrés Cano, 2021).



*Ilustración 13. Aplicación en COT. A) Planificación preoperatoria. B) Premoldeado de placas. C) Ayuda intraoperatoria. D) Esterilizado para uso quirúrgico. E) Comunicación médico-paciente. F) Formación médica. (Andrés Cano, 2021)*

Una de las principales ventajas de la I3D es que facilita la medicina personalizada, es decir se puede adaptar el tratamiento en función de las características individuales del paciente. Las guías quirúrgicas paciente-específicas (Ilustración 14) son las herramientas más usadas en la actualidad, están elaboradas mediante I3D con material biocompatible. Estas se adaptan de forma exacta y son aplicadas en tratamientos como una osteotomía con la finalidad de insertar implantes, administrar fármacos u obtener injertos (Andrés Cano, 2021).



*Ilustración 14. Ejemplo de guía quirúrgica paciente-específica. A) Modelo CAD y planificación virtual. B) Modelo CAD de la guía quirúrgica. C) intervención con guía quirúrgica paciente-específica. (Andrés Cano, 2021)*

La I3D también hace posible la elaboración de implantes personalizados, estos son creados a partir de imágenes médicas del propio paciente que seguramente con métodos tradicionales no sería posible. Asimismo, aplicando la tecnología de fabricación a través de sinterizado selectivo láser se pueden realizar implantes metálicos con un costo significativamente menor a métodos tradicionales (Andrés Cano, 2021).

Según la Sociedad Americana de Radiología (RSNA) después de revisar y clasificar diferentes casos de cirugía ortopédica y traumatología (COT) ha llegado a la conclusión de que los biomodelos no son tan útiles en fracturas simples (1/10), sin embargo, cobran mucha relevancia en fracturas complejas como displasias de cadera y tumores óseos con afección articular (8/10) (Chepelev, Wake, & Ryan, 2018). Incluso se ha demostrado que el uso de biomodelos 3D disminuye el tiempo quirúrgico de ciertas intervenciones con un ahorro de 3700\$ (Andrés Cano, 2021).

Con la tecnología de escaneado 3D se pueden elaborar órtesis y férulas (Ilustración 15) aplicando la I3D. Una mejor adaptación a la anatomía del paciente es la principal ventaja en comparación con las órtesis tradicionales. Adicionalmente, los nuevos materiales desarrollados han facilitado el diseño y validación de órtesis y férulas para tratar enfermedades de miembros superiores e inferiores, incluso deformidades en la columna como la escoliosis. Otra ventaja de la I3D en contraste con métodos tradicionales es la reducción de tiempos de fabricación acompañado de un menor coste.

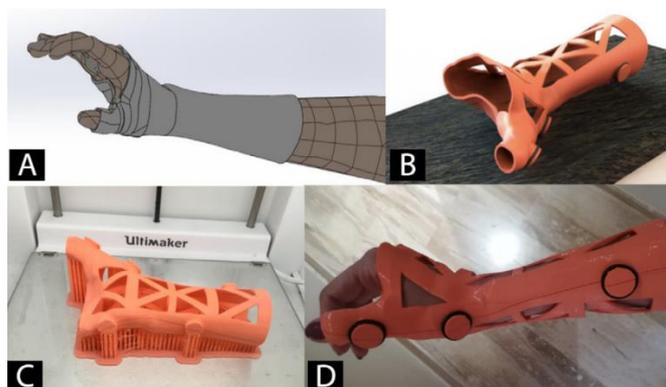


Ilustración 15. Órtesis de muñeca fabricada con I3D. A) Renderizado virtual. B) Modelo CAD. C) Impresión 3D con material PLA. D) Aplicación correcta de órtesis. (Andrés Cano, 2021)

## 2.2 UNA MIRADA AL FUTURO

### Bio-impresión

El principal desafío de la impresión 3D es transformarla en una bio-impresión, lograr replicar cualquier parte del cuerpo humano reduciendo la complejidad de las microestructuras de los componentes de la matriz celular (MEC) y reproducir los diferentes tipos de células con tal precisión que sea posible que ellas recuperen su función biológica. (César Juárez, y otros, 2018)

En la actualidad ya se cuenta con una bio-tinta diseñada por el doctor Vladimir Mironov, proveniente de la Universidad de Carolina del Sur en Estados Unidos, esta bio-tinta está formada por células denominadas esferoides y un gel biodegradable (Ilustración 16). Las células caen de la impresora en forma de gotas sobre una superficie gelatinosa que actúa como soporte para la elaboración de la bio-estructura (Cernevale, 2010).

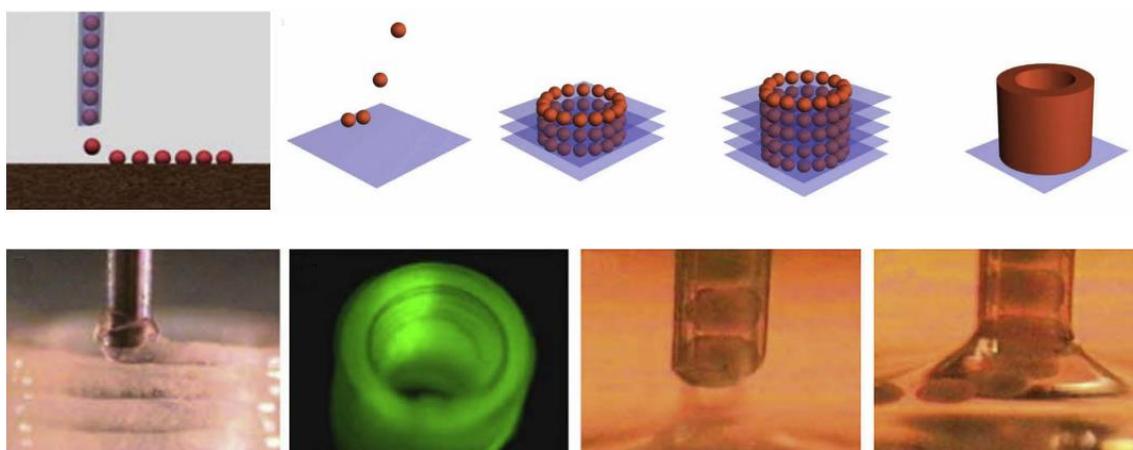


Ilustración 16. Proceso de colocación de esferoides capa por capa a través de la bioimpresora. (Cernevale, 2010)

Con esta técnica es posible imprimir piel, huesos, cartílagos y vasos sanguíneos (Ilustración 17), pero ¿por qué no órganos o estructuras más complejas?



*Ilustración 17. Red de vasos sanguíneos impresos. (Cernevale, 2010)*

Porque los órganos son sistemas mecánicos, no se pueden replicar con simplemente capas de tejidos hechos a base de células y aglomeradas en una matriz. Para llegar a crear órganos habría que saber dónde ubicar cada esferoide puesto que la posición de cada célula se relaciona con su función.

Este solo es el menor de los problemas, ya que el verdadero desafío es que las células sepan lo que deben hacer, que den respuesta a señales endocrinas como lo hace el hígado y páncreas o a señales más complejas como lo son los estímulos nerviosos a los cuales reacciona un corazón. Es por estas razones que de momento aún estamos lejos pero cada vez más cerca de la ambición de reproducir órganos funcionales (Cernevale, 2010).

### **Limitaciones de la impresión 3D en medicina**

Hay 3 grandes problemas y se resumen en: las dimensiones del prototipo a imprimir, los costos y el tiempo (César Juárez, y otros, 2018).

En una impresora 3D no se pueden imprimir figuras excesivamente grandes, lo que se acostumbra es reproducir el modelo en miniatura o a su vez, si no es factible esta solución imprimir la pieza por partes para después anexarlas entre sí. De cualquier modo, si las soluciones citadas no son probables habría una limitación.

Con respecto al costo, en la mayoría de los casos clínicos la fabricación de prototipos rápidos no justifica los costos generados por el prototipo puesto que los procedimientos o implantes tradicionales suelen ser suficiente, sin embargo, en casos quirúrgicos específicos o más complicados estos costos pueden compensarse con una mayor tasa de éxito en la operación o reduciendo los tiempos operativos. Por último, hablando de los tiempos de impresión, el tiempo empleado para imprimir es demasiado alto, es imposible su uso en casos de emergencia donde se necesite un diagnóstico raudo. (César Juárez, y otros, 2018)

## **2.3 PELIGROS**

Como todo en la vida nada puede ser perfecto, y la fabricación aditiva no es una exención, al ser relativamente reciente también cuenta con obstáculos y vacíos legales.

En países como España muchos peligros están regulados, pero también se debe tomar en cuenta la situación de países en vías de desarrollo donde la fabricación aditiva no es tan popular como lo puede ser la República Democrática del Congo donde el sueldo anual de cada persona es 466\$ (Geografía Infinita, 2022). Es por esta razón que a continuación se exponen algunos puntos.

### **Vacío de responsabilidad**

Si una persona se rompe el cuello practicando algún deporte mientras usa un casco impreso en 3D, si alguien dispara un arma de fuego impresa en 3D matando o lastimando a alguien existe un vacío desde el punto de vista de la responsabilidad, que se resolvería entre el fabricante de la impresora, el propietario de la impresora y quien diseñó el producto (Bucco, 2016).

Por el contrario, en España no existe este vacío de responsabilidad. Problemáticas como estas estarán sujetas al artículo 138.2 de la Ley General de Consumidores y Usuarios (LGDCU). Donde se imputa la responsabilidad al productor (importador o fabricante). También la Ley brinda la posibilidad de aplicar una responsabilidad solidaria entre todos los organismos que intervengan en la producción del producto (Vazquez, 2021).

### **Limitación ética**

En algún punto millones de personas serían capaces de fabricar, copiar, comprar, intercambiar o vender productos de uso diario, este hecho podría golpear duramente a la economía suprimiendo muchos puestos de trabajo en determinados mercados o nichos de mercado (Bucco, 2016).

### **Creación de armas**

Ya es un hecho poder imprimir armas en 3D, las hay incluso con la capacidad de pasar los detectores de metales. Existen empresas que ofrecen poder imprimir la réplica exacta de un arma desde casa, proporcionan todos los archivos necesarios para que se puedan imprimir. Hay réplicas que tienen la capacidad de realizar hasta 200 disparos de proyectiles reales (Bucco, 2016).

La creación de armas en España se encuentra regulada por el artículo 564 del Código Penal. Donde se señala que para fabricar armas mediante la impresión 3D se deberá tener licencia, de lo contrario la conducta delictiva se castigará con hasta 2 años de cárcel (Vazquez, 2021).

### **Derechos de autor**

La fabricación aditiva abre la puerta a la piratería, hay numerosos programas gratuitos e información gratuita en internet para diseñar y fabricar un sinnúmero

de productos. Este problema se puede asemejar a la gran piratería digital que azotó la industria del cine y la música (Bucco, 2016).

En España tanto el artículo 18 de la Ley de Propiedad Intelectual (LPI) como el artículo 270 del Código Penal sancionan toda actividad de reproducción ilícita cuando existe ánimo de lucro (Vazquez, 2021).

### **Compromiso de fabricantes**

Debería haber regulaciones para fabricantes de productos alimenticios que usan impresoras en 3D, por ejemplo, si alguna empresa fabrica cubiertos, estos cubiertos podrían ser impresos con plástico ABS, material que contiene BPA (bisfenol-A), esta sustancia está prohibida en varios países, adicionalmente en las impresoras 3D hay espacios donde fácilmente se pueden acumular bacterias por lo que los mecanismos de la impresora se deberían limpiar periódicamente (Bucco, 2016).

Esta problemática también se encuentra en España por la Ley General de Consumidores y Usuarios. Donde se imputa la responsabilidad al productor (Vazquez, 2021).

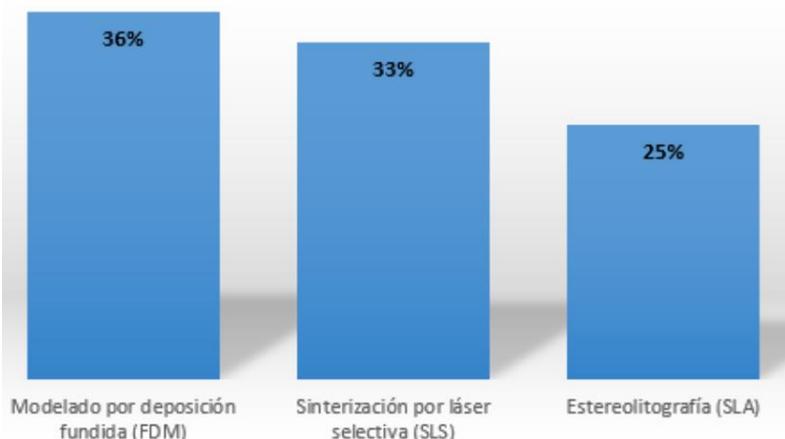
### **Drogas**

La creación de drogas es posible, personas con conocimientos suficientes en química podrían imprimir desde ricino hasta cocaína (Bucco, 2016).

En España la elaboración de estupefacientes, cultivo y tráfico se castigará de acuerdo al artículo 368 del Código Penal. En el marco de la impresión 3D la simple tenencia de planos digitales también se castigará junto a la persona que elabore las drogas y a la persona que facilite el consumo de éstas (Vazquez, 2021).

## **2.4 MÉTODOS DE FABRICACIÓN ADITIVA**

Seguidamente se detallan los métodos básicos de fabricación aditiva, puede haber ciertas variaciones y se podrían detallar más, pero se cree innecesario ya que no es el tema principal de este trabajo de investigación por consiguiente se describen las 3 más esenciales: Extrusión de material (MEX) también denominado modelado por deposición fundida, sinterización por láser selectiva (SLS) y estereolitografía (SLA). En la ilustración 18 se expone la popularidad de cada método.

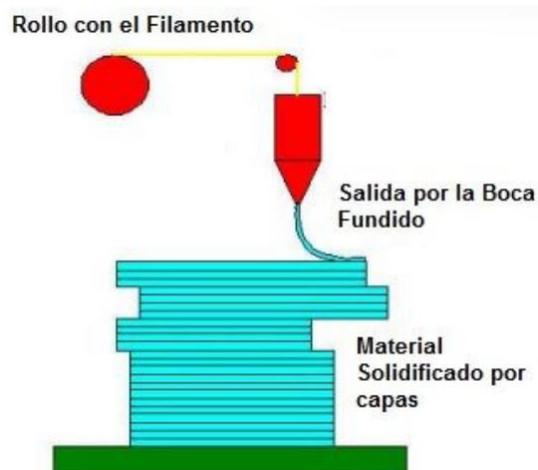


*Ilustración 18. Tecnologías de impresión 3D. (Quemada Villagómez, Alcaraz Caracheo, Ruíz Mondragón, & Rodríguez Castro, 2017)*

### **Extrusión de material**

Es el procedimiento más empleado en la impresión 3D, también es el método que se utilizará para llevar a cabo los objetivos de este TFE.

Esta tecnología consiste en calentar un material sólido hasta una temperatura alta, cerca de la temperatura de fusión para transformarlo en un fluido, posteriormente el material fundido es colocado a través de un extrusor o *nozzle* capa tras capa, tras ser aplicado el material se solidifica y así sucesivamente para formar un objeto complejo en 3D (Ilustración 19) (Quemada Villagómez, Alcaraz Caracheo, Ruíz Mondragón, & Rodríguez Castro, 2017).



*Ilustración 19. Proceso del modelado por deposición fundida. (Quemada Villagómez, Alcaraz Caracheo, Ruíz Mondragón, & Rodríguez Castro, 2017)*

### **Sinterización por láser selectiva**

La SLS se caracteriza en tener una cama de material en polvo, un láser solidifica este material, la cama se alimenta continuamente de material en polvo y el proceso con el láser se repite a cada instante, capa por capa hasta formar el

modelo que se pretende imprimir (Ilustración 20) (Quemada Villagómez, Alcaraz Caracheo, Ruíz Mondragón, & Rodríguez Castro, 2017).

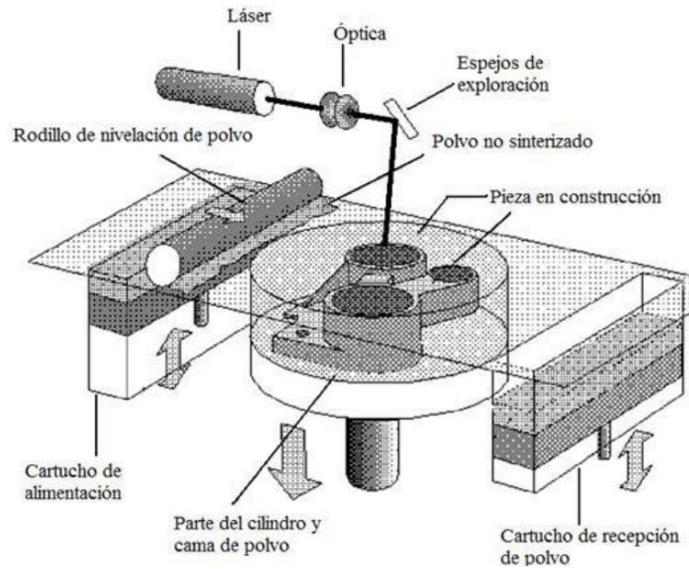


Ilustración 20. Proceso de sinterización por láser selectivo. (Quemada Villagómez, Alcaraz Caracheo, Ruíz Mondragón, & Rodríguez Castro, 2017)

## Estereolitografía

También llamado método de fotosolidificación, a diferencia de los anteriores aquí hay una base que se sumerge en resina líquida (Ilustración 21). El láser se encarga de solidificar la resina mientras que la base se sumerge lo suficiente para solidificar otra capa de la resina, repitiendo este ciclo, solidificando capa tras capa se crea el cuerpo deseado (Quemada Villagómez, Alcaraz Caracheo, Ruíz Mondragón, & Rodríguez Castro, 2017).

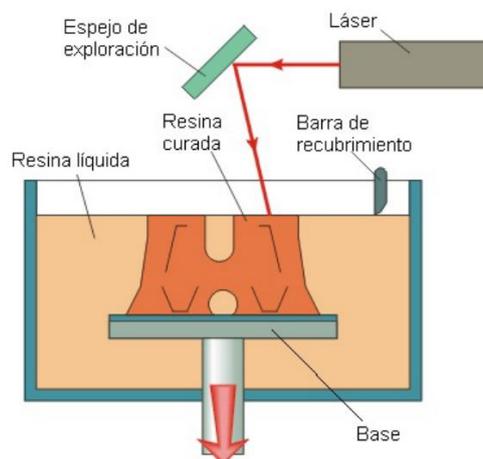


Ilustración 21. Esquema de impresión 3D por estereolitografía. (Quemada Villagómez, Alcaraz Caracheo, Ruíz Mondragón, & Rodríguez Castro, 2017)

## **3. DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS**

En los apartados posteriores y a manera de contexto antes de detallar la configuración de prototipos se expondrá el origen de los casos clínicos, los archivos necesarios para imprimir, la forma de calibrar la impresora Ender 3, los principales parámetros de impresión y cómo solucionar problemas comunes de la técnica MEX.

### **3.1 ORIGEN DE CASOS CLÍNICOS**

Todos los prototipos que se imprimirán a lo largo de este trabajo de investigación son demandados por el Hospital Clínico Quirúrgico “Hermanos Ameijeiras” (Ilustración 22), ubicado en Cuba.



*Ilustración 22. Hospital Clínico Quirúrgico "Hermanos Ameijeiras". (RADIO REBELDE, 2022)*

Es un hospital de escasos recursos y por medio de las piezas impresas se pretende beneficiar en la medida de lo posible a la distinguida institución nombrada.

### **3.2 ARCHIVOS NECESARIOS PARA IMPRIMIR**

Lo primero es contar con un archivo tipo STL (STereoLithography), Los archivos STL pueden ser obtenidos a través del formato DICOM (Digital Imaging and Communication In Medicine) que es una norma internacional para almacenar imágenes médicas como MRI (imágenes por resonancia magnética) y CT (Tomografía Computarizada). Un archivo DICOM contiene una o varias imágenes y además el contexto en el que se tomó la imagen. Este contexto puede ser los datos del paciente (edad, nombre, apellidos), doctor que demanda la prueba, centro médico donde se realiza la prueba, tipo de prueba a la que corresponde la imagen, la máquina, posición del paciente en cada imagen tomada, número de tomas, dimensión de imágenes, entre otros (Instituto Madrileño de Traumatología, 2022). Los DICOM son de vital importancia en este proyecto, sin ellos el hospital no podría brindarnos archivos STL para optimizar.

Antes de imprimir el STL puede ser editado con algún editor de malla como el software Autodesk Meshmixer (Ilustración 23). El principal motivo es optimizarlo para que luego en la impresión demore menos tiempo y se use menos material. Es importante que a la hora de mejorar el STL no se quite información y se lo haga respetando su forma y sobre todo la parte que se quiere estudiar u observar.

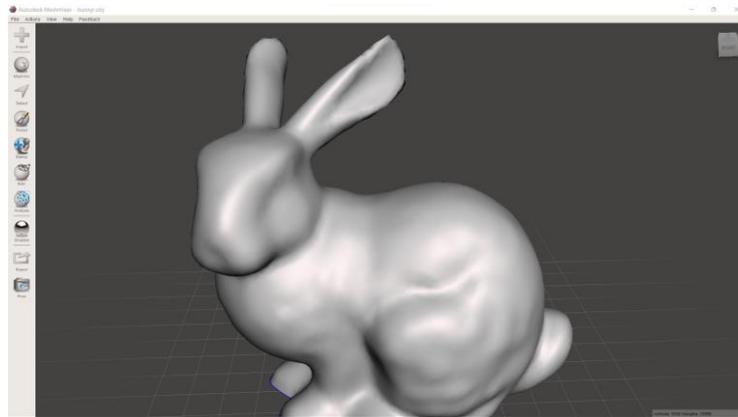


Ilustración 23. Interfaz Autodesk Meshmixer.

Con el STL optimizado se procede a indicar los parámetros de impresión, estos parámetros de impresión también influyen el tiempo y calidad de impresión. Para dicha tarea se puede usar el programa Ultimaker Cura (Ilustración 24).

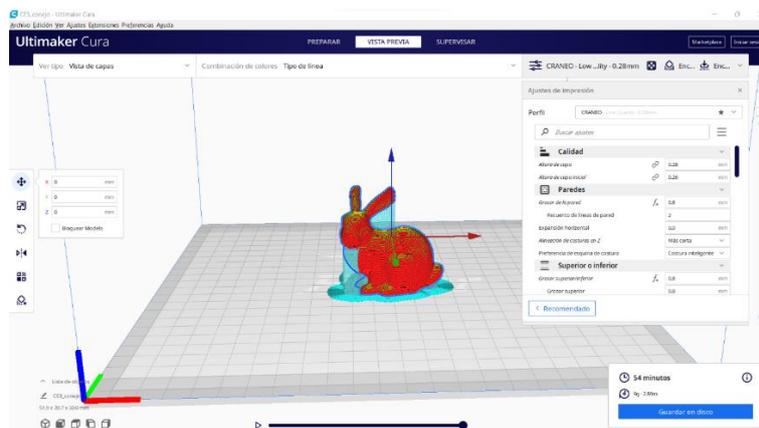


Ilustración 24. Interfaz Ultimaker Cura.

Finalizado el tratamiento en Ultimaker Cura, se genera un archivo tipo GCODE, este archivo representa el lenguaje con el que la impresora sabrá en qué direcciones debe moverse, cuánto material debe extruir, a qué temperatura debe estar, entre otras.

El GCODE se inserta a través de una microSD en la impresora (Ilustración 25).



Ilustración 25. Entrada de tarjeta.

### 3.3 CALIBRACIÓN DE LA IMPRESORA

Antes de imprimir es esencial calibrar la impresora.

La calibración consiste en ubicar al *nozzle* a una altura que no se encuentre demasiado pegada de la cama ni a una altura demasiado alta.

Si la altura de la boquilla es muy baja no se extruirá material, causando una base muy débil, por otro lado, si la altura del *nozzle* es muy alta el plástico tendrá una mala adhesión comprometiéndolo otra vez a la base de lo que se vaya a imprimir (Ilustración 26).

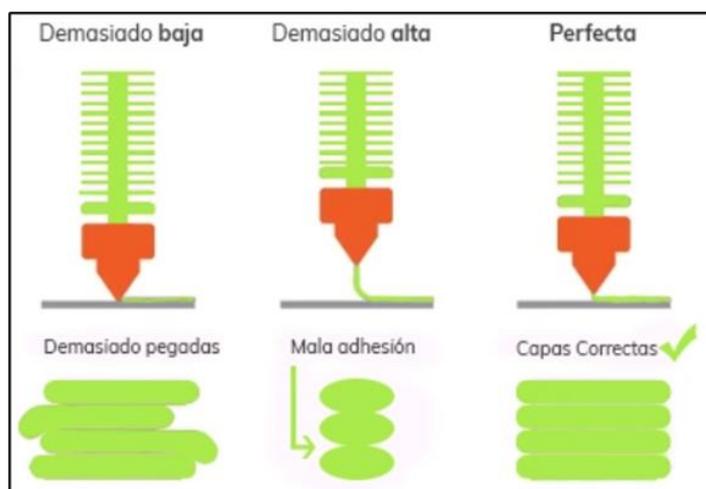
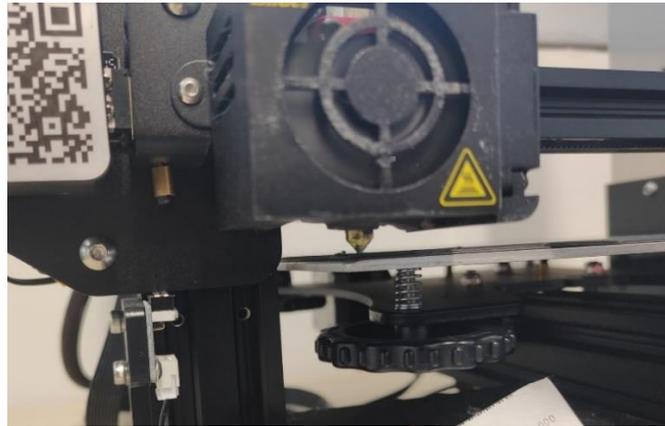


Ilustración 26. Altura ideal de la boquilla. (Impresoras 3D, 2020)

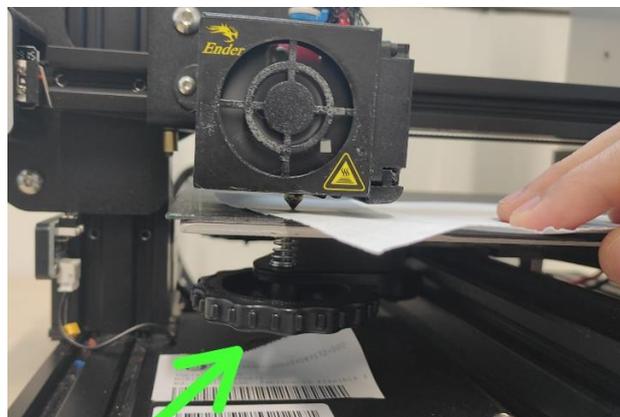
A continuación, se detallan algunos pasos para realizar una calibración.

1. Lo primero es mandar un “Auto home” a la impresora, para que esta vuelva a su punto de origen (ilustración 27).



*Ilustración 27. Posición de origen en impresora Ender 3.*

2. Una vez la impresora está en su coordenada 0, se debe colocar un papel entre el *nozzle* y la cama (Ilustración 28).
3. Luego hay que ir girando la válvula para que la cama suba o baje, lo que se busca es una altura tal que el papel roce con el *nozzle* (Ilustración 28). Se debe repetir este paso para las 4 esquinas de la cama.



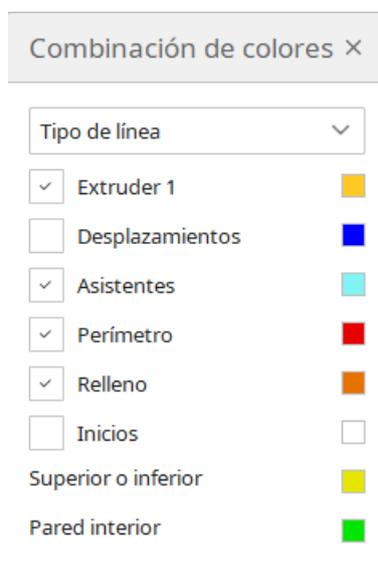
*Ilustración 28. Calibración del primer vértice de la cama.*

Una vez hecha la calibración se puede comenzar a imprimir.

### **3.4 PRINCIPALES PARÁMETROS DE IMPRESIÓN**

Un factor muy importante al momento de imprimir son los parámetros de impresión puesto que de ellos depende en gran medida el tiempo de impresión y la calidad de la misma. Los parámetros se deben ajustar acorde al prototipo, el modelo de la impresora, el material que se usa, el diámetro de filamento, entre otros. Seguidamente se detallan algunos de ellos. Por último, mencionar que son los parámetros que permite el programa Ultimaker Cura.

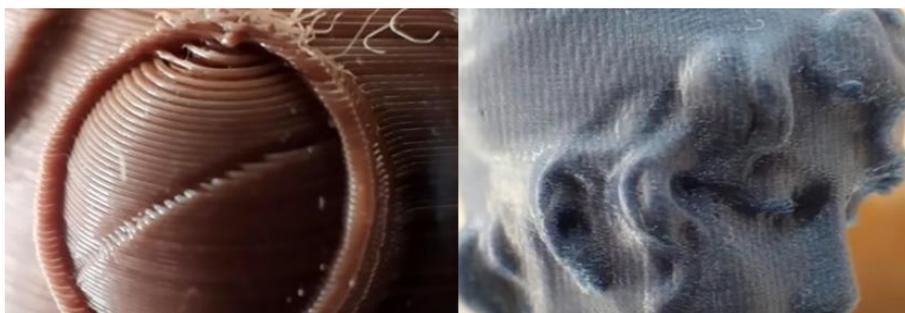
Asimismo, la ilustración 29 pretende ayudar a la comprensión de los parámetros.



*Ilustración 29. Guía de colores al momento de configurar la impresión en Ultimaker Cura.*

**Altura de capa:** prácticamente vendría a ser el nivel de definición que se busca en la pieza, cuando se imprime, el material fundido es depositado en “capas”, estas capas son líneas horizontales con cierto grosor que descansan una encima de otra (Ilustración 30), entre menos grosor tengan las capas más definición y detalle tendrá la pieza, pero el tiempo de impresión aumentará y en consecuencia la cantidad de material usado también.

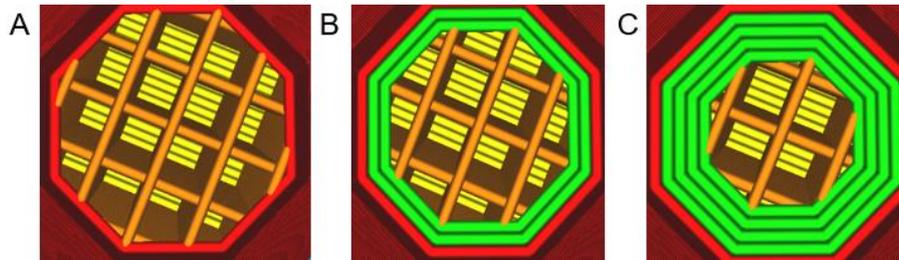
El grosor máximo de capa que se puede tener es un *80% del diámetro del nozzle* (Día de la Toalla, 2021). Las impresoras que se usaron en este proyecto cuentan con un nozzle de 0.4mm de este modo la altura máxima de capa sería 0.32mm.



*Ilustración 30. Comparación entre una altura de capa gruesa (izquierda) y una más fina (derecha). (Día de la Toalla, 2021)*

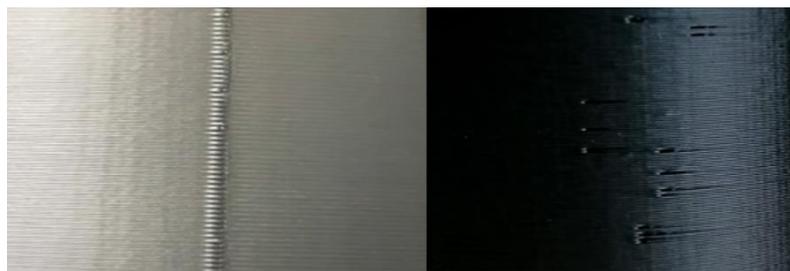
**Altura de capa inicial:** altura de capa de la primera extrusión.

**Grosor de pared:** es el contorno del relleno, entre más grosor de pared más resistente es la pieza, pero de igual manera al parámetro anterior aumentaría el tiempo y el material usado. Vale la pena mencionar que el grosor de pared depende del tamaño del diámetro del *nozzle*, por ejemplo, si el diámetro es 0.4mm solo se pueden poner grosores múltiples a este (Ilustración 31).



*Ilustración 31. A) Grosor de pared 0.4mm. B) Grosor de pared 1.2mm. C) Grosor de pared 2mm.*

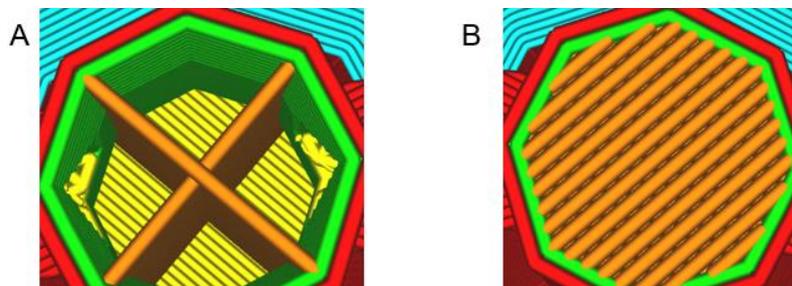
**Alineación de costuras en Z:** al momento de imprimir la máquina imprime una capa, sube y luego imprime otra capa. El punto inicial donde inicia cada capa deja una pequeña “pelotita” por la inercia de la extrusión (Ilustración 32). El software Ultimaker Cura permite elegir un sitio específico donde ubicar estas costuras, con el objetivo de mejorar la estética del prototipo a imprimir.



*Ilustración 32. alineación de costuras en Z ubicadas en una coordenada específica (izquierda) y costuras ubicadas al azar (derecha). (Día de la Toalla, 2021)*

**Densidad de relleno:** también va ligado a la resistencia que se busca en la pieza, se recomienda un relleno mínimo del 8% y si se lo llegase a aumentar hasta el 100% se obtendría una pieza sólida.

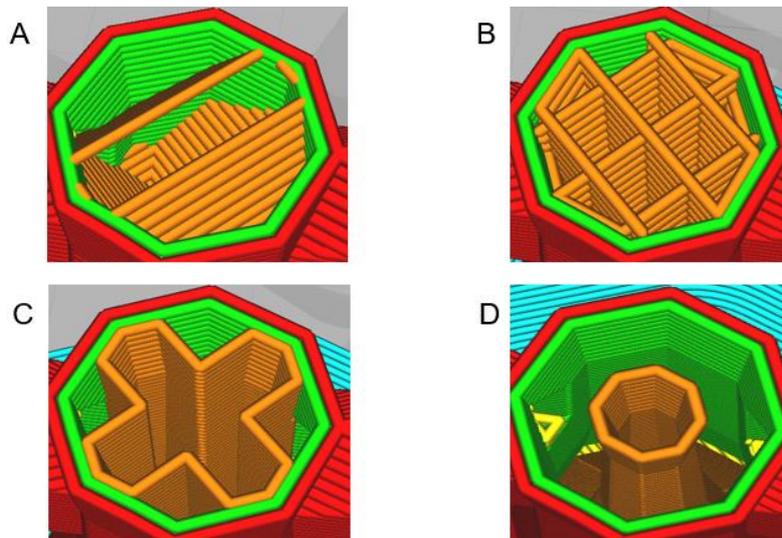
En la ilustración 33 se puede divisar el patrón de relleno de líneas y densidades de relleno de 0.8% y 90%.



*Ilustración 33. A) Patrón de relleno líneas y densidad de relleno 0.8%. B) Patrón de relleno líneas y densidad de relleno 90%.*

**Patrón de relleno:** Adicionalmente se puede escoger el patrón de relleno, el más rápido es líneas y el más resistente es cúbico bitrucado (Día de la Toalla, 2021).

Visualizando la ilustración 34 se puede apreciar distintos patrones de relleno, todos con una densidad de relleno de 20%.



*Ilustración 34. A) Patrón de relleno cúbito bitrucado y densidad de relleno 20%. B) Patrón de relleno zigzag y densidad de relleno 20%. C) Patrón de relleno cruz y densidad de relleno 20%. D) Patrón de relleno concéntrico y densidad de relleno 20%.*

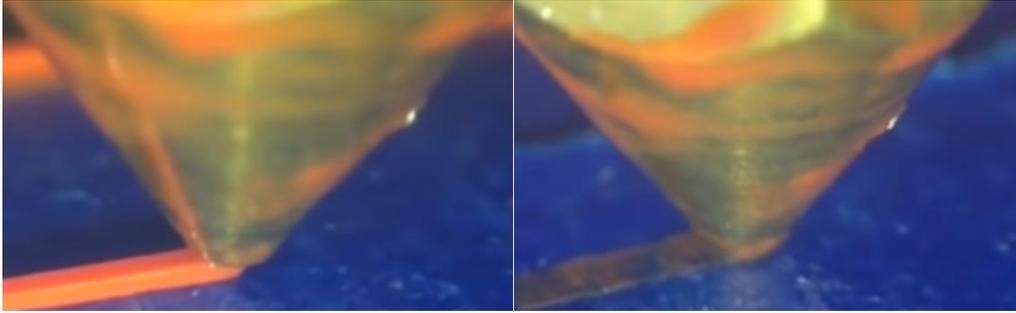
**Temperatura de impresión:** parámetro que depende del material con el que se imprime, para PLA de Fillamentum sería entre 200 y 210°C. Es imprescindible para poder fundir el material.

**Temperatura de placa de impresión:** la placa de impresión o cama es donde se imprimirá la pieza (Ilustración 35), de la misma forma que la temperatura de impresión este parámetro depende del material, para PLA se recomienda 50°C. Esta temperatura ayuda a la adhesión del material a la cama.



*Ilustración 35. Placa de impresión de la impresora Ender 3. (Ikkaro, 2022)*

**Flujo:** este parámetro sirve para compensar el exceso o la escasez de material que bota el *nozzle*. Por ejemplo, si sale poco material se podría poner un valor de 105% para compensar esta falta, y si sale demasiado material se podría poner 95% (Ilustración 36).



*Ilustración 36. Flujo recomendado (izquierda) y escasez de flujo (derecha). (Día de la Toalla, 2021)*

**Velocidad de impresión:** es la velocidad a la que se mueve el cabezal de la impresora cuando extruye material y cuando no lo está haciendo.

**Velocidad de desplazamiento:** velocidad a la que se mueve el cabezal cuando no está extruyendo.

**Velocidad de relleno:** velocidad a la que se imprime el relleno.

**Velocidad de pared exterior:** velocidad a la que se imprime la pared exterior, se aconseja que sea menor a la velocidad de pared interior, puesto que la pared exterior es lo que se verá (Día de la Toalla, 2021).

**Velocidad de pared interior:** Puede ser mayor que la velocidad de pared exterior pero no es recomendable que la supere por mucho, la pared interior no se verá de forma que la calidad puede ser menor (Día de la Toalla, 2021).

**Velocidad capa inicial:** es la primera capa que extruirá la impresora, por lo tanto, su velocidad debe ser mucho menor que las demás para garantizar una correcta adherencia (Día de la Toalla, 2021).

**Habilitar retroacción:** es recomendable activarla. Cuando el *nozzle* no está extruyendo material por inercia suele seguir saliendo y la solidificación de estas “gotitas” puede influenciar negativamente en la impresión llegando incluso a descuadrar la impresión. Cuando se activa la retroacción la impresora cada que no debe extruir material da un pequeño salto en el eje Z (Ilustración 37) de manera que el exceso de material salga (Día de la Toalla, 2021).

Adicionalmente la ilustración 38 enseña el beneficio estético de habilitar la retroacción.

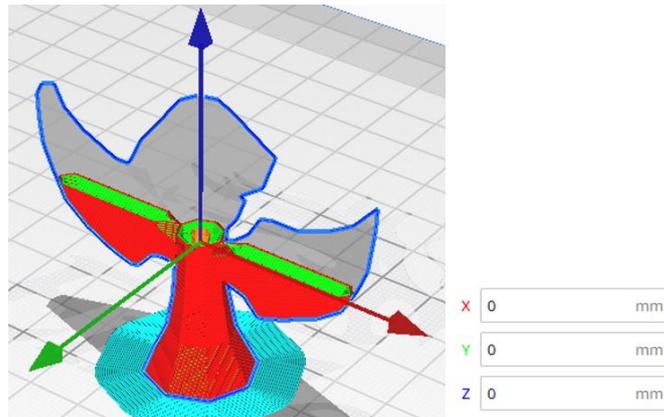


Ilustración 37. Sistema de referencia en Ultimaker Cura, azul (Z), verde (Y) y rojo (X).

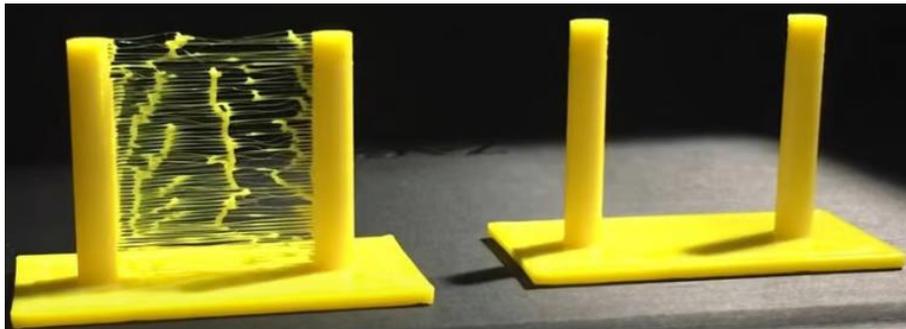


Ilustración 38. Beneficio de activar la retroacción. (ALL3DP, 2022)

Importante es mencionar que cuando se usa material flexible como TPU no se debe habilitar la retroacción porque se puede tapar la impresora.

**Refrigeración:** Automáticamente la impresora disminuye este valor en las primeras capas para que adhieran bien a la cama.

**Soporte:** al momento de imprimir, en determinadas partes si no hubiera soporte la impresora imprimirá en la nada por efecto de la gravedad. El soporte es una estructura desechable que no forma parte de la pieza en cuestión pero que es esencial para poder imprimirla (Ilustración 39).

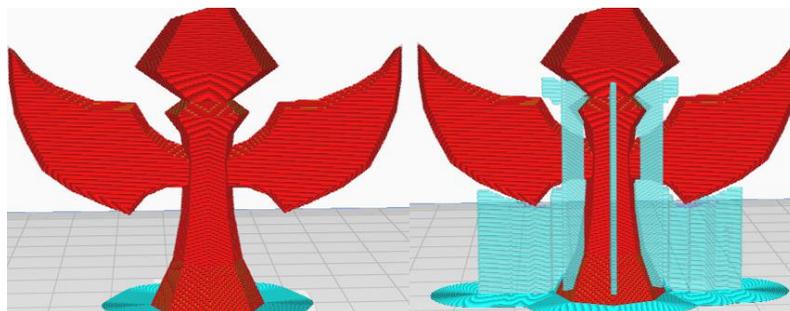
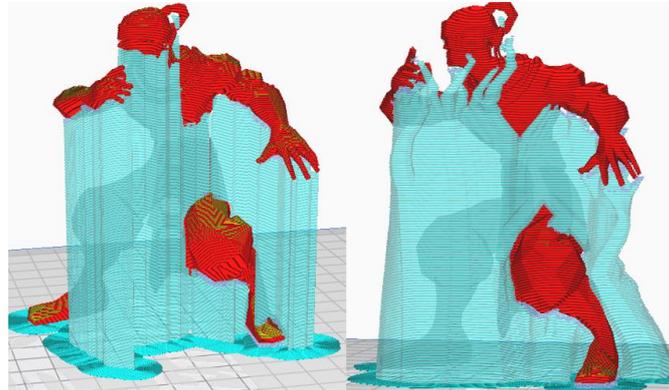


Ilustración 39. Estructura sin soporte (izquierda) y estructura con soporte (derecha).

**Estructura de soporte:** existen 2 técnicas para generar soporte, la primera es “normal”, en ella se crean las estructuras de soporte directamente debajo del

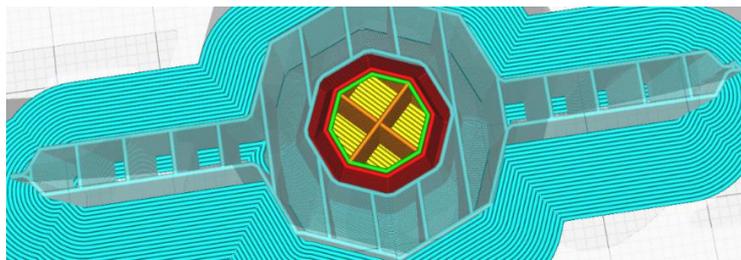
voladizo. Como segunda opción hay la técnica “árbol” que crea ramas que rodean al voladizo y se ensanchan en algunas partes del modelo (Ilustración 40).

La primera técnica se recomienda aplicarla para geometrías sencillas mientras que la segunda permite asegurar geometrías más complejas.



*Ilustración 40. Estructura de soporte normal (izquierda) y estructura de soporte árbol (derecha).*

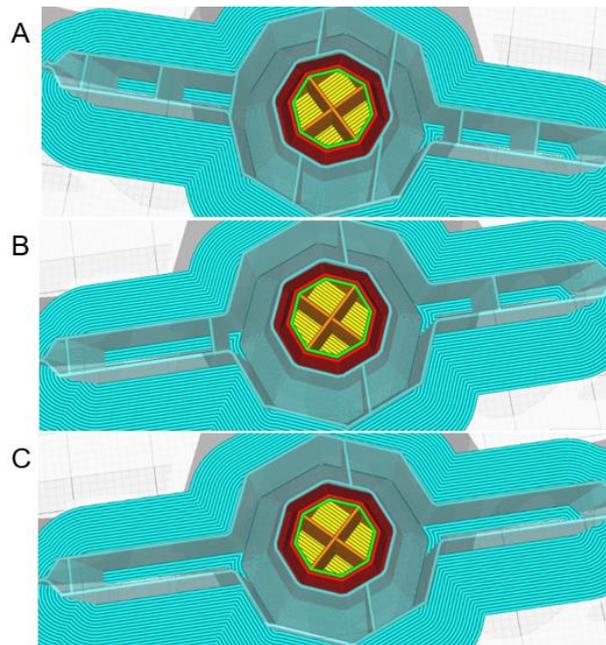
**Patrón de soporte:** de igual manera que en el parámetro “patrón de relleno” también existen diferentes patrones para el soporte. Hay que tener en cuenta que como el soporte es material que se va a desechar siempre se busca emplear el mínimo material sin descuidar la función del soporte. Es por esta razón que no se suelen usar patrones tan complicados. El más rentable es el de líneas (Ilustración 41).



*Ilustración 41. Patrón de soporte tipo línea.*

**Distancia de línea de soporte:** como se mencionó anteriormente un soporte se busca que sea lo más simple posible, también que sea liviano y no tenga mucho relleno, este parámetro nos permite “vaciar” el interior del soporte a medida que aumentemos su valor.

A través de la ilustración 42 se puede ver el efecto de variar la distancia de línea de soporte.



*Ilustración 42. A) Distancia de línea de soporte 8mm. B) Distancia de línea de soporte 15mm. C) Distancia de línea de soporte 30mm.*

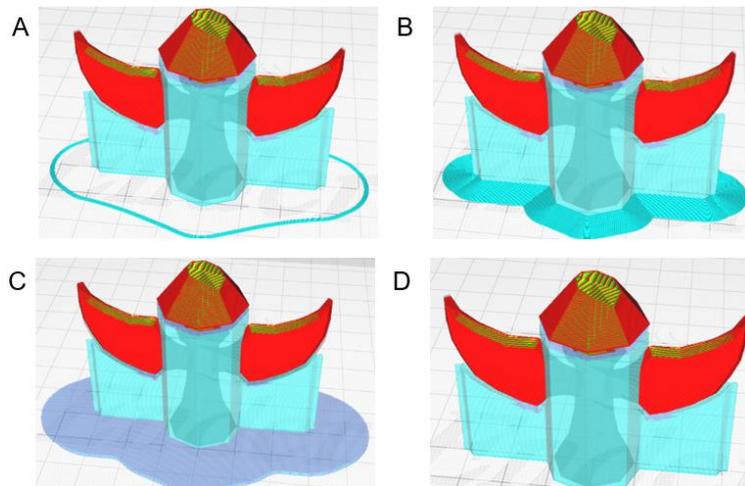
**Distancia en Z del soporte:** un soporte debe ser fácil de despegar, y este parámetro se encarga de eso, pero se debe tener cuidado ya que si lo separamos demasiado entonces no cumpliría con el objetivo de “soportar” los voladizos. Hay una regla que es empírica, para determinar la distancia ideal en Z del soporte debemos fijarnos en la altura de capa que tenemos y sumarle 0.05mm. Por ejemplo, si la altura de capa que deseamos es 0.28mm la distancia en Z del soporte debería ser de 0.33mm (Día de la Toalla, 2021).

**Distancia X/Y del soporte:** es la distancia en el plano XY del soporte con respecto a la pieza, entre menor distancia X/Y más difícil podría ser quitar el soporte, incluso puede dejar marcas afectando la calidad de la pieza. Se suele utilizar un valor de 1.2mm.

**Tipo de adherencia a la placa de impresión:** las primeras extrusiones del *nozzle* son de vital importancia, es la base de la impresión, y de esta base dependerá si el objeto está bien adherido a la placa de impresión o si durante la impresión el objeto se mueve ya sea por vibraciones y la impresión falla.

Hay 4 tipos de adherencia (Ilustración 43): falda, borde, balsa y ninguno. El más recomendable es borde ya que rodea toda la superficie base del prototipo, entre más área más estable será el modelo a imprimir.

La balsa a diferencia del borde tiene cierto relieve, en cuanto a efectividad ambas son recomendables. La falda se puede usar si la impresión no es muy compleja. Asimismo, es posible no tener ningún tipo de adherencia.



*Ilustración 43. A) Adherencia tipo falda. B) Adherencia tipo borde. C) Adherencia tipo balsa. D) Sin ningún tipo de adherencia.*

### **3.5 SOLUCIÓN DE ERRORES ORDINARIOS**

#### **La impresora no extruye las primeras capas**

Esto suele suceder cuando la impresora está parada y el *nozzle* se encuentra caliente, hay material que sigue saliendo por la inercia del calor y en los primeros segundos de la impresión puede que no extruya plástico cuando debería hacerlo (Ilustración 44).



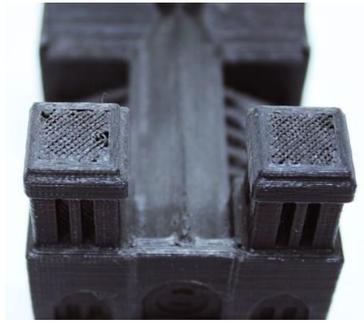
*Ilustración 44. Escasez de filamento en la extrusión. (Leon3D, 2022)*

Una solución podría ser habilitar el parámetro “*tipo de adherencia a la placa de la impresión*” de esta forma la impresora imprimirá unas capas de prueba hasta que salga el material (Leon3D, 2022).

Otra razón por la que se puede originar este problema es porque el *nozzle* está demasiado cerca de la placa de impresión. Para arreglarlo se debería volver a calibrar la impresora, pero esta vez separando un poco más la cama del *nozzle*.

#### **Extrusión de poco o mucho plástico**

Mediante la ilustración 45 se puede observar mejor la extrusión de poco plástico.

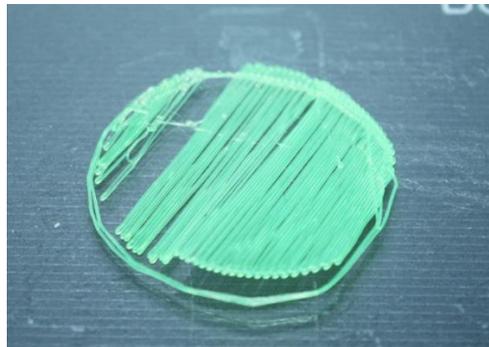


*Ilustración 45. Defectos en la impresión por poco plástico. (Leon3D, 2022)*

Este problema se lo puede solucionar aumentando el parámetro “flujo”. Dependiendo de cuánta sea la falta de material se podría poner un valor de 105% o 110%. De igual forma si extruye mucho plástico se podría variar el flujo de 90 a 95%.

### **La primera capa no se adhiere a la cama de impresión**

Si la primera capa no se adhiere la demás tampoco lo harán (Ilustración 46).



*Ilustración 46. Falta de adherencia en la cama de impresión. (Leon3D, 2022)*

Se puede deber a diferentes causas, el *nozzle* puede estar muy separado de la placa de impresión, la velocidad de impresión es demasiado alta o la temperatura de la cama de impresión es muy baja (Leon3D, 2022).

Si el *nozzle* está muy separado esto se puede reparar calibrando la impresora. Se puede disminuir la velocidad de impresión desde los parámetros. Por último, la temperatura de la placa depende del material con el que se imprime, es importante que la cama no esté fría ya que esto dificultará la adherencia de las primeras capas. Por ejemplo, si se imprime con PLA la temperatura de cama recomendable es de 50°C.

### **Hilos en la impresión**

Los “hilos” son provocados como consecuencia del movimiento del *nozzle* (Ilustración 47).



*Ilustración 47. Hilos en consecuencia de no habilitar la retroacción. (Leon3D, 2022)*

La temperatura de extrusión puede ser demasiado alta, provocando que el filamento dentro se vuelva muy viscoso y que salga sin que el *nozzle* esté funcionando, se puede disminuir de 5 a 10°C para solucionar el fallo. Adicionalmente se puede activar el parámetro “retroacción”, este parámetro eliminará estos fallos.

### **Sobrecalentamiento**

Como se distingue en la ilustración 48 el sobrecalentamiento puede deformar la pieza y dañar la impresión. Si la impresora no cuenta con un ventilador (Ilustración 49) esta será la principal causa del problema.



*Ilustración 48. Deformación de impresión por sobrecalentamiento. (Leon3D, 2022)*



*Ilustración 49. Sistema de refrigeración en impresora Ender 3. (Inovamarket, 2022)*

En caso que posea el ventilador y el problema persista se pueden probar 2 cosas.

Reducir la temperatura de extrusión para que el filamento se solidifique más pronto, no obstante, no debemos reducirla en exceso puesto que se podría

atascar el nozzle. La segunda opción es bajar la velocidad de impresión, cuando se imprime a altas velocidades no se da tiempo a que las capas extruidas se solidifiquen antes de depositar otra capa y hacer esto constantemente llevaría al sobrecalentamiento (Leon3D, 2022).

### **Desplazamiento de capas**

Si se imprime a altas velocidades de desplazamiento está el riesgo que las capas se muevan en el eje X/Y (Ilustración 50). Esto ya depende de la impresora y conocerla muy bien. Para el modelo Ender 3 pro suele ser 150mm/s la velocidad de desplazamiento sin embargo también se puede disminuirla (Leon3D, 2022).



*Ilustración 50. Desplazamiento de capas durante la extrusión. (Leon3D, 2022)*

Otra forma de que no se desplacen las capas es seleccionar un *tipo de adherencia a la placa de impresión* de borde. De esta manera se brindará mayor estabilidad a la base y quedará bien adherida y es menos probable que se desplace la impresión.

### **Relleno incompleto**

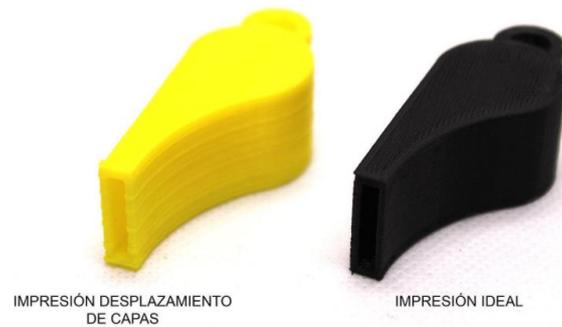
En ocasiones el relleno puede salir incompleto o deformado y sin definición (Ilustración 51), cuando pasa esto se sugiere disminuir la velocidad actual de relleno en un 50%. También se aconseja probar con otro tipo de relleno más sencillo como lo puede ser el de línea. Por último, se podría aumentar el parámetro “flujo” si es que la falta de relleno es notable.



*Ilustración 51. Patrón de relleno impreso correctamente (izquierda) y patrón de relleno deficiente (derecha). (Leon3D, 2022)*

### **Desajuste en la impresión**

El desajuste de capas también puede ser intercalado (Ilustración 52).

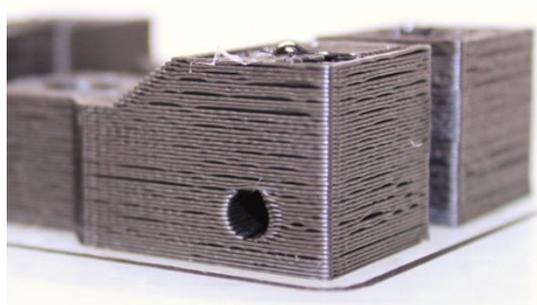


*Ilustración 52. Leve desplazamiento en las capas (izquierda) e impresión ideal (derecha). (Leon3D, 2022)*

Es aconsejable disminuir la velocidad de impresión, como se explicó anteriormente, cuando se imprime muy deprisa no da tiempo a que las capas adyacentes se solidifiquen y esto provoca que al finalizar la impresión esta no sea limpia.

### **Separación de capas**

Si nota que las capas no terminan de unirse por completo (Ilustración 53) se puede disminuir la altura de capa, la altura de capa nunca debe sobrepasar el 80% del diámetro de la boquilla o *nozzle*.



*Ilustración 53. Separación de capas. (Leon3D, 2022)*

En caso que la altura de capa sea la correcta se puede probar a aumentar la temperatura de extrusión 5°C en cada intento.

### **Warping**

Como se distingue en la ilustración 54 el warping es la curvatura de las primeras capas de impresión. Esto ocurre cuando las capas superiores se enfrían contrayéndose y estirando a las capas más calientes que se encuentran abajo tocando la placa de impresión. Es un problema que suele aparecer durante la impresión. Para evitarlo se puede calentar más la cama o utilizar una cámara de impresión cerrada de manera que la temperatura se mantenga constante a lo largo de todo el proceso (Craftcloud, 2022).



*Ilustración 54. Warping. (Craftcloud, 2022)*

Siempre que existe el warping habrá cracking (Ilustración 55), separación de capas intermedias.



*Ilustración 55. Cracking. (3Dmarket, 2022)*

## **4. CASOS DE ESTUDIO**

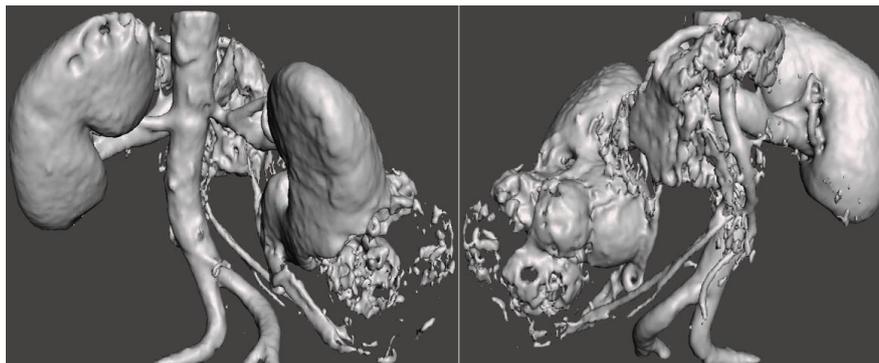
Seguidamente, se detallarán todos los casos clínicos, optimización de archivos STL y parámetros de impresión. Se expondrá también los problemas que surgieron, las mejoras o soluciones implementadas para cada caso, recomendaciones y finalmente se hará una discusión.

Todos los esfuerzos, diseños, investigaciones y ensayos que se realizarán a continuación son con el fin de crear biomodelos funcionales. Al igual que en los casos quirúrgicos mencionados en el estado de arte se busca que estas biorréplicas puedan ser de utilidad para simular una intervención quirúrgica, ayudar a los cirujanos durante la operación, ofrecer un tratamiento personalizado basado en la anatomía exacta del paciente y que sirvan como soporte para mejorar la comunicación médico-paciente.

Por otra parte, uno de los principales inconvenientes de la impresión 3D es el tiempo. Los casos de estudio a continuación se optimizarán pensando en un escenario de emergencia. De modo que el tiempo empleado para fabricar cada biomodelo es crucial.

### **4.1 RIÑONES**

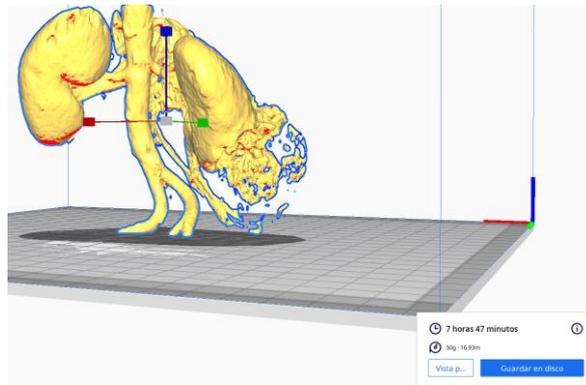
La ilustración 56 muestra el archivo STL tal cual se lo recibió por parte del Hospital.



*Ilustración 56. Archivo STL original de los riñones desde distintos ángulos.*

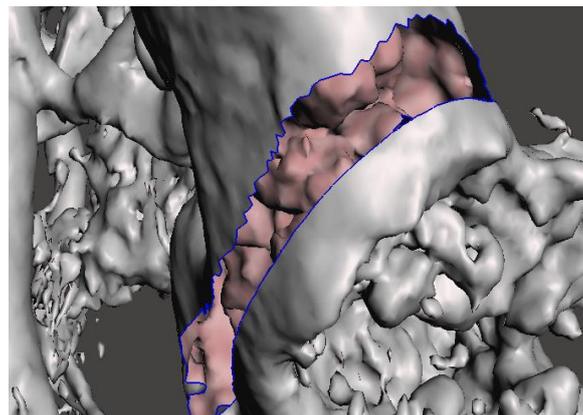
Imprimir directamente el STL es inviable, tiene demasiados detalles y estructuras irregulares que no son de interés. La impresión a una escala del 50% tarda más de 7 horas (Ilustración 57) y a una escala del 100% más de 24 horas. Es evidente que el archivo no está optimizado y se necesitará un editor de malla para modificar el STL.

El software que se usará es Meshmixer.



*Ilustración 57. Tiempo necesario para imprimir los riñones a una escala del 50%.*

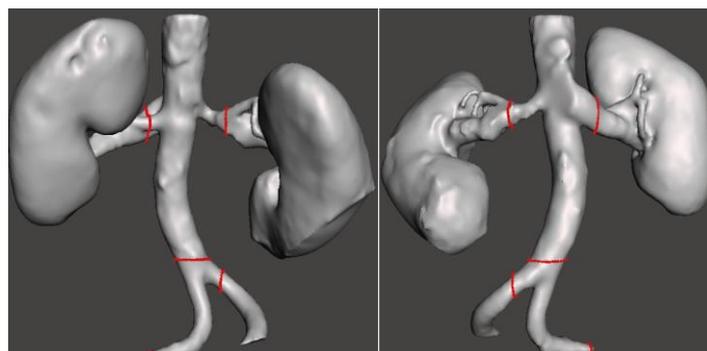
Incluso efectuando cortes se puede ver que los riñones no son huecos y contienen estructuras internas que solo dificultan más la impresión (Ilustración 58).



*Ilustración 58. Estructuras internas que se aprecian después de realizar un corte en Meshmixer.*

Haciendo uso de Meshmixer se pretende borrar todo lo que no sea esencial sin comprometer el modelo como tal, es decir el interés por el cual se lo quiere imprimir.

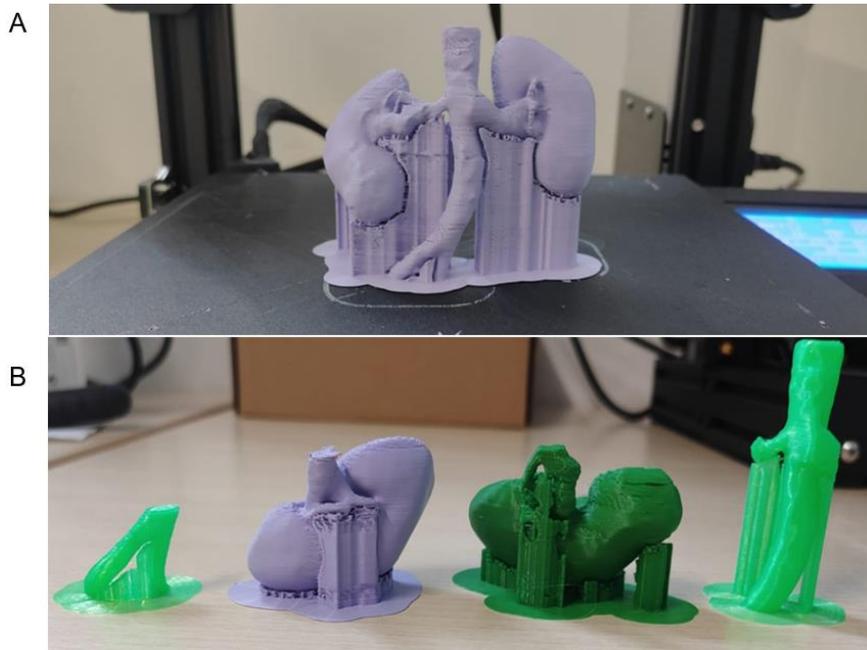
Como se puede observar en la ilustración 59 se ha pulido un poco la superficie, eliminado los defectos y vaciado los riñones. Hecha esta optimización se ha logrado que imprimir la pieza entera a una escala del 50% tarde 2 horas con 15 minutos.



*Ilustración 59. Archivo STL luego de modificarlo en Meshmixer.*

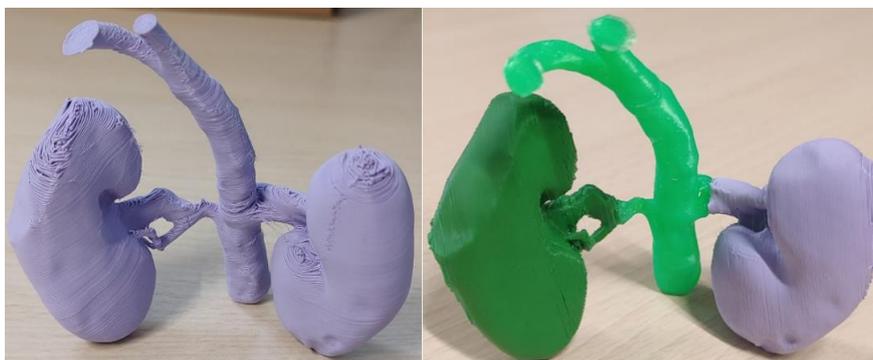
### **4.1.1 PRIMERA VERSIÓN**

Ahora se proponen dos opciones para imprimir, la primera es imprimir toda la pieza y la segunda es imprimirla en 4 partes y luego unir las con algún tipo de pegamento. Se ofrecen estas alternativas por el acabado estético. En ocasiones los soportes suelen dejar marcas. Al imprimir toda la pieza de una sola es probable que necesite más soporte y por ende que estos dejen algún tipo de seña. Seguidamente se muestra el resultado de ambos métodos en la ilustración 60.



*Ilustración 60. A) Riñones impresos de una sola donde se puede apreciar el amplio uso de soportes. B) Riñones impresos en 4 partes.*

Se enseña el resultado final al quitar los soportes junto con el ensamble de las cuatro piezas (Ilustración 61), para unir las se usó pegamento hecho a base de cianoacrilato de etilo.



*Ilustración 61. Riñones impresos de una sola (izquierda) y riñones impresos por separado y luego unidos (derecha).*

Como se observa la pieza impresa con el primer método tiene unas pequeñas “cicatrices” donde estaba ubicado el soporte en cambio las piezas que se imprimieron por separado son casi imperceptibles.

No se han requerido cambios de modo que con la primera versión fue suficiente.

#### **4.1.2 PARÁMETROS DE IMPRESIÓN**

Tabla 1. Parámetros de impresión de los riñones.

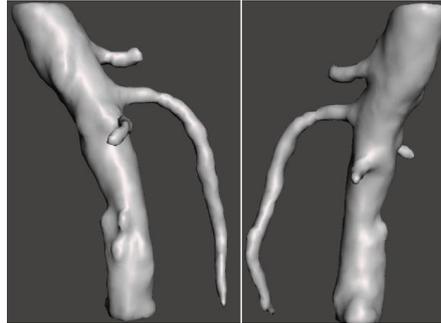
	<b>1.º método (una sola pieza)</b>	<b>2.º método (cuatro piezas)</b>
<b>Material</b>	<b>PLA</b>	<b>PLA</b>
Altura de capa	0.28 mm	0.28 mm
Altura de capa inicial	0.26 mm	0.26 mm
Grosor de pared	0.8 mm	0.8 mm
Alineación de costuras en Z	Más corta	Más corta
Densidad de relleno	3%	3%
Patron de relleno	Líneas	Líneas
Temperatura de impresión	200 °C	200 °C
Temperatura de placa de impresión	50 °C	50 °C
Flujo	100%	100%
Velocidad de impresión	40 mm/s	40 mm/s
Velocidad de desplazamiento	80 mm/s	80 mm/s
Velocidad de relleno	40 mm/s	40 mm/s
Velocidad pared exterior	40 mm/s	40 mm/s
Velocidad pared interior	40 mm/s	40 mm/s
Velocidad capa inicial	20 mm/s	20 mm/s
Retroacción	Habilitada	Habilitada
Refrigeración	100%	100%
Soporte	Habilitado	Habilitado
Estructura de soporte	Normal	Normal
Patron de soporte	Líneas	Líneas
Distancia de línea de soporte	20 mm	20 mm
Distancia en Z del soporte	0.33 mm	0.33 mm
Distancia X/Y del soporte	1.2 mm	1.2 mm
Tipo de adherencia a la placa de impresión	Borde	Borde
Escala	50%	50%
Peso*	20 g	16 g
Tiempo empleado	2 h 58 min	1 h 58 min

\*El peso incluye los soportes y todas las piezas necesarias.

No se varió los parámetros de impresión, sólo se alternó la forma de imprimir para comparar cual tiene un mejor acabado.

## **4.2 AORTA ABDOMINAL**

La ilustración 62 muestra el STL tal cual se lo recibió por parte del Hospital.



*Ilustración 62. Archivo STL original de la aorta abdominal.*

En comparación a los riñones esta no es una geometría tan compleja, por lo que se procedió a imprimirla con unos parámetros de impresión de prueba. En el primer intento se usó un tipo de adherencia a la placa de impresión de falda con la finalidad de ahorrar un poco de tiempo y se usó un grosor de pared de 0.4 mm

### **4.2.1 PRIMERA VERSIÓN**

No obstante, a lo largo la impresión en la parte más delgada de una de las “ramas” la pieza se movía, descuadrándola e impidiendo que las capas se peguen (Ilustración 63).



*Ilustración 63. Desplazamiento de capas durante la impresión.*

Esto era causado por el roce del *nozzle* con la capa, cada vez que bajaba para extruir movía ligeramente la estructura. La manera de solucionar esta falla podría ser utilizando un tipo de adherencia de borde ya que brinda más estabilidad a la pieza y la protege de vibraciones propias de la máquina (Ilustración 64).

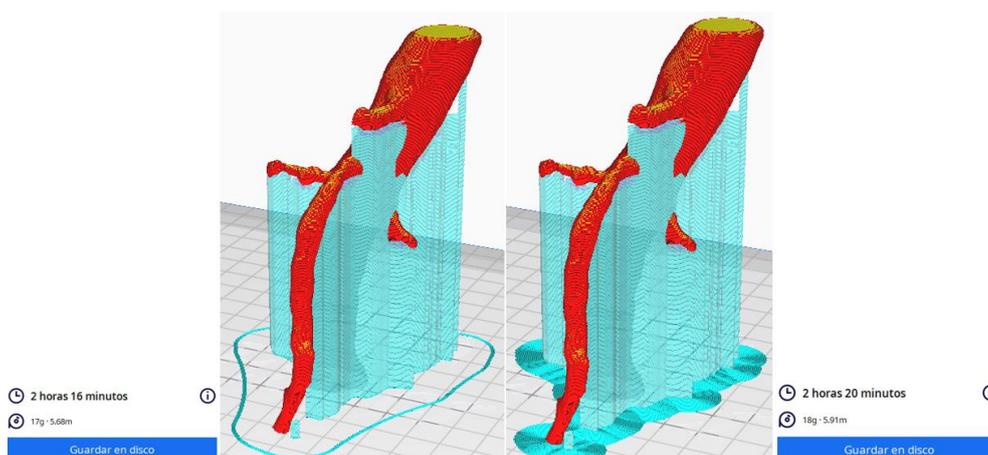


Ilustración 64. Aorta abdominal con adherencia tipo falda (izquierda) y aorta abdominal con adherencia tipo borde (derecha).

### 4.2.2 VERSIÓN FINAL

Asimismo, se puede decir que utilizar un tipo de adherencia de falda a la larga no fue lo más óptimo, solo se ahorran 4 minutos de impresión y 1 gramo de material PLA, pero se corre el riesgo que la impresión salga mal. El resultado final de la impresión es mostrado en la ilustración 65.



Ilustración 65. Aorta abdominal impresa.

### 4.2.3 PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

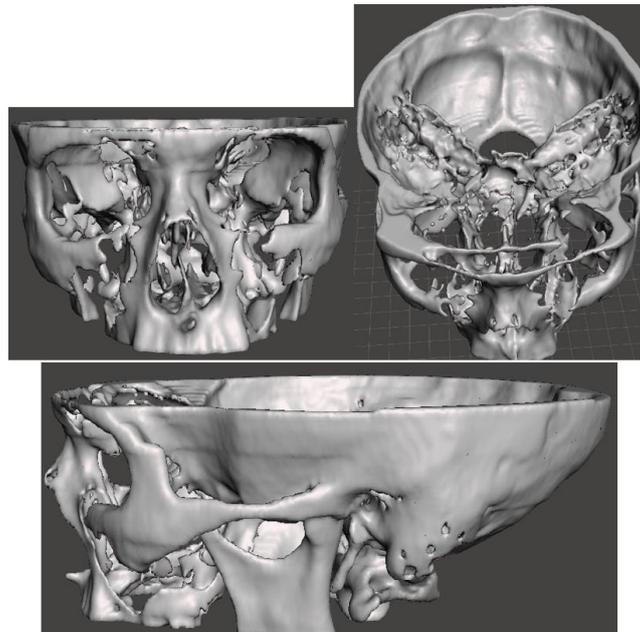
Tabla 2. Parámetros de impresión de la aorta abdominal.

Material	PLA
Altura de capa	0.2 mm
Altura de capa inicial	0.26 mm
Grosor de pared	0.8 mm
Alineación de costuras en Z	Más corta
Densidad de relleno	8%
Patron de relleno	Líneas

Temperatura de impresión	200 °C
Temperatura de placa de impresión	50 °C
Flujo	100%
Velocidad de impresión	50 mm/s
Velocidad de desplazamiento	150 mm/s
Velocidad de relleno	50 mm/s
Velocidad pared exterior	40 mm/s
Velocidad pared interior	50 mm/s
Velocidad capa inicial	20 mm/s
Retroacción	Habilitada
Refrigeración	100%
Soporte	Habilitado
Estructura de soporte	Normal
Patrón de soporte	Líneas
Distancia de línea de soporte	10 mm
Distancia en Z del soporte	0.35 mm
Distancia X/Y del soporte	1.2 mm
Tipo de adherencia a la placa de impresión	Borde
Escala	100%
Peso	13.54 g
Tiempo empleado	2 h 20 min

### 4.3 CRÁNEO

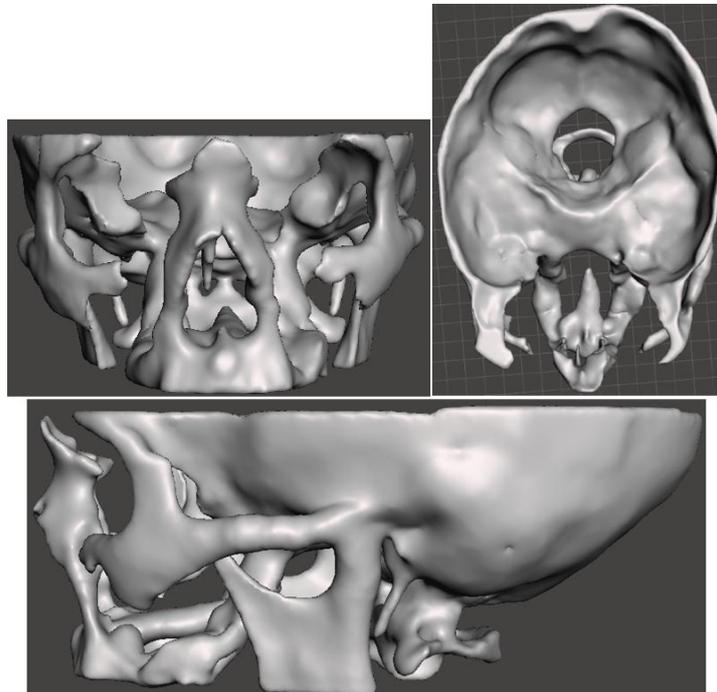
La ilustración 66 muestra el archivo STL tal cual se lo recibió por parte del Hospital Ameijeiras.



*Ilustración 66. Archivo STL original del cráneo.*

Imprimir este archivo a alta velocidad, con un bajo nivel de calidad y empleando una escala del 50% tarda aproximadamente 7 horas con 39 minutos. Es sencillo divisar en las fotos el por qué. Tiene demasiadas partes discontinuas, geometrías complejas que no benefician el análisis del cráneo y la superficie se puede pulir aún más.

Con Meshmixer se pretende mejorar estos aspectos suavizando la superficie y reconstruyendo la estructura en la medida de lo posible. El resultado de la edición se enseña en la ilustración 67.



*Ilustración 67. Archivo STL luego de modificarlo en Meshmixer.*

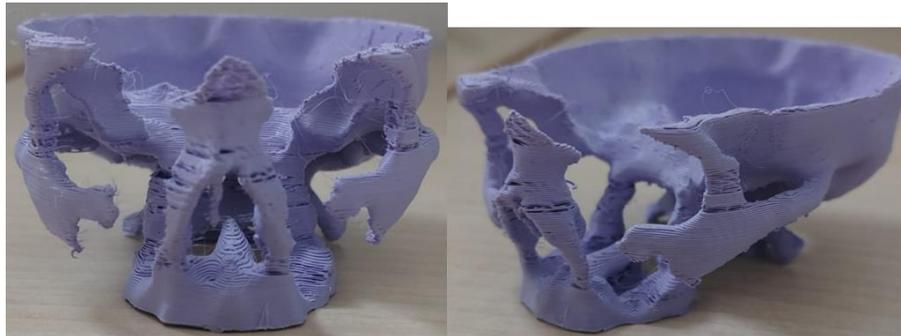
Al momento de imprimir se hicieron 3 intentos, dos de ellos fueron con los mismos parámetros de impresión mientras que en ultimo se los modificó.

#### **4.3.1 PRIMERA VERSIÓN**

Durante el primer intento no se usó retroacción a diferencia del segundo intento (Ilustraciones 68-69).



*Ilustración 68. Primer intento desde distintos ángulos, no se usó la retroacción.*



*Ilustración 69. Segundo intento, se usó la retroacción, pero las capas no terminaban de unirse.*

Con el color del material se pueden diferenciar ambos intentos. Hubieron partes donde las capas no terminaban de unirse (Ilustración 79). Esto se puede deber a una altura de capa relativamente grande (0.28 mm), una velocidad de impresión de la capa exterior alta (40 mm/s) o incluso al choque térmico causado por la temperatura ambiente, pero este factor ya es más difícil controlarlo.

También se puede ver los pequeños “hilos” que se forman cuando no se habilita la retroacción. Para esta configuración el tiempo de impresión es de 4 horas con 4 minutos.

#### **4.3.2 VERSIÓN FINAL**

Tomando en cuenta los errores anteriores se procedió a mejorar la impresión (Ilustración 70), se habilitó la retroacción, se disminuyó la altura de capa y se disminuyó la velocidad, también en el parámetro de “alineación de costuras en Z” se optó por ponerlo en modo aleatorio para que la impresión sea más rápida, adicionalmente la escala se la disminuyó de 50% a 40%.



Ilustración 70. Tercer intento, con una menor altura de capa, menor velocidad de impresión, menor escala y habilitando la retroacción.

Con respecto al tiempo, la pieza tardó 3 horas con 57 minutos en imprimirse.

#### **4.3.3 COMPARATIVA DE PARÁMETROS DE IMPRESIÓN**

Tabla 3. Parámetros de impresión para los distintos intentos del cráneo.

<b>Versión</b>	<b>1.º</b>	<b>Final</b>
<b>Material</b>	<b>PLA</b>	<b>PLA</b>
Altura de capa	0.28 mm	0.2 mm
Altura de capa inicial	0.26 mm	0.24 mm
Grosor de pared	0.8 mm	0.8 mm
Alineación de costuras en Z	Más corta	Aleatoria
Densidad de relleno	3%	3%
Patron de relleno	Líneas	Lineas
Temperatura de impresión	200 °C	200 °C
Temperatura de placa de impresión	50 °C	50 °C
Flujo	100%	100%
Velocidad de impresión	40 mm/s	40 mm/s
Velocidad de desplazamiento	80 mm/s	80 mm/s
Velocidad de relleno	40 mm/s	50 mm/s
Velocidad pared exterior	40 mm/s	30 mm/s
Velocidad pared interior	40 mm/s	40 mm/s
Velocidad capa inicial	20 mm/s	20 mm/s
Retroacción	Deshabilitada	Habilitada
Refrigeración	100%	100%
Soporte	Habilitado	Habilitado
Estructura de soporte	Normal	Normal

Patron de soporte	Líneas	Lineas
Distancia de línea de soporte	10 mm	20 mm
Distancia en Z del soporte	0.33 mm	0.25 mm
Distancia X/Y del soporte	1.2 mm	1.2 mm
Tipo de adherencia a la placa de impresión	Borde	Borde
Escala	50%	40%
Peso	33 g	19 g
Tiempo empleado	4 h 4 min	3 h 57 min

#### 4.4 VÉRTEBRAS

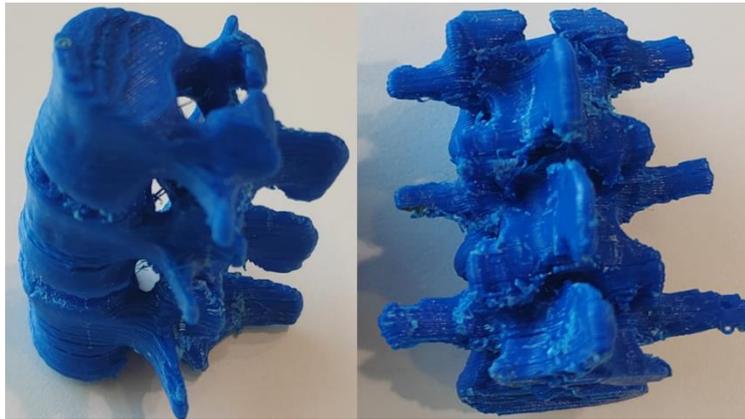
La ilustración 71 es el archivo STL tal cual se lo recibió, a diferencia del ejemplo anterior del cráneo es un archivo bastante nítido, como mucho lo que se podría hacer es pulir un poco la superficie, pero en este caso se prefiere no hacerlo para conservar su forma original.



Ilustración 71. Archivo STL original de las vértebras.

##### 4.4.1 PRIMERA VERSIÓN

Se puede apreciar como en la parte inferior hay capas que no terminan de unirse y atrás de las vértebras hay demasiadas marcas consecuencia de una configuración de soportes que se puede mejorar (Ilustración 72).

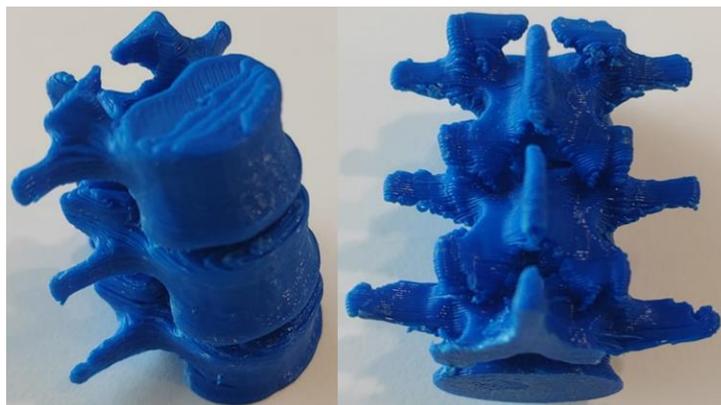


*Ilustración 72. Primer intento desde distintos ángulos. Se aprecian muchas marcas donde antes se ubicaban los soportes.*

Disminuyendo la altura de capa y la velocidad de impresión se podría mejorar la adherencia de las capas mientras que para las cicatrices de los soportes se podría aumentar los parámetros “distancia en Z del soporte” y “distancia X/Y del soporte”.

#### **4.4.2 VERSIÓN FINAL**

Efectuando las mejores comentadas anteriormente se logró una mayor definición en la impresión (Ilustración 73).



*Ilustración 73. Segundo intento de impresión con una mejor configuración de soportes.*

Incrementando los parámetros del soporte se buscaba alejarlos un poco de la estructura de manera que al momento de quitarlos estos no dejaran muchas marcas. Por otra parte, disminuyendo la velocidad de impresión y la altura de capa se evita el problema de la separación de capas.

La pieza final se imprimió en 2 horas y 11 minutos.

#### **4.4.3 COMPARATIVA DE PARÁMETROS DE IMPRESIÓN**

Tabla 4. Parámetros de impresión para los distintos intentos de las vértebras.

<b>Versión</b>	<b>1.º</b>	<b>Final</b>
<b>Material</b>	<b>PLA</b>	<b>PLA</b>
Altura de capa	0.31 mm	0.3 mm
Altura de capa inicial	0.28 mm	0.28 mm
Grosor de pared	0.8 mm	0.8 mm
Alineación de costuras en Z	Aleatoria	Aleatoria
Densidad de relleno	8%	8%
Patron de relleno	Líneas	Lineas
Temperatura de impresión	200 °C	200 °C
Temperatura de placa de impresión	50 °C	50 °C
Flujo	100%	100%
Velocidad de impresión	50 mm/s	50 mm/s
Velocidad de desplazamiento	155 mm/s	150 mm/s
Velocidad de relleno	50 mm/s	50 mm/s
Velocidad pared exterior	50 mm/s	30 mm/s
Velocidad pared interior	50 mm/s	50 mm/s
Velocidad capa inicial	20 mm/s	20 mm/s
Retroacción	Habilitada	Habilitada
Refrigeración	100%	100%
Soporte	Habilitado	Habilitado
Estructura de soporte	Normal	Normal
Patron de soporte	Líneas	Lineas
Distancia de línea de soporte	4 mm	4 mm
Distancia en Z del soporte	0.30 mm	0.35 mm
Distancia X/Y del soporte	1.15 mm	1.2 mm
Tipo de adherencia a la placa de impresión	Ninguna	Ninguna
Escala	40%	40%
Peso	11 g	12 g
	2 h 3 min	2 h 11 min

#### 4.5 TUMOR EN PULMÓN

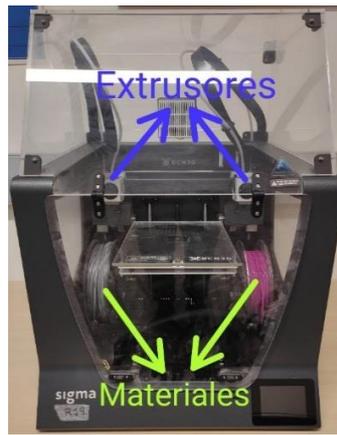
A diferencia de los casos anteriores este tiene una complejidad extra puesto que se usará la técnica de la doble extrusión. Lo que se aspira es imprimir con dos colores para poder distinguir el tumor del pulmón.

La doble extrusión permite que una impresora 3D pueda trabajar con dos extrusores de forma independiente y al mismo tiempo. Con este procedimiento se puede intercalar en cada capa un material u color distinto. Hay que mencionar también que cada extrusor trabaja por separado de manera que cada uno tendrá sus propios parámetros de impresión o temperatura dependiendo del material que se use. Seguidamente en la ilustración 74 se expone un ejemplo.



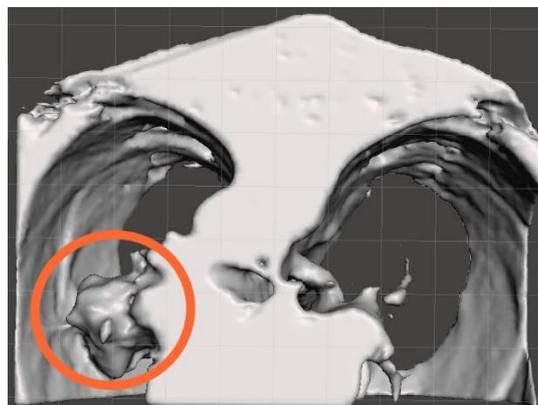
*Ilustración 74. Aplicación de la doble extrusión.*

Para cumplir esta meta se utilizará la impresora BCN3D Sigma R19 (Ilustración 75).



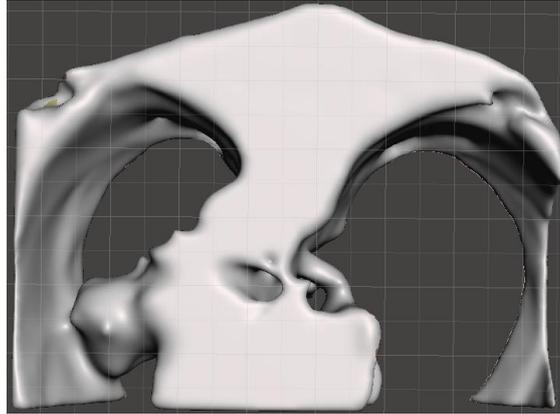
*Ilustración 75. Impresora BCN3D Sigma R19.*

A continuación, se muestra el archivo STL original brindado por el hospital (Ilustración 76). En rojo se encierra el tumor.



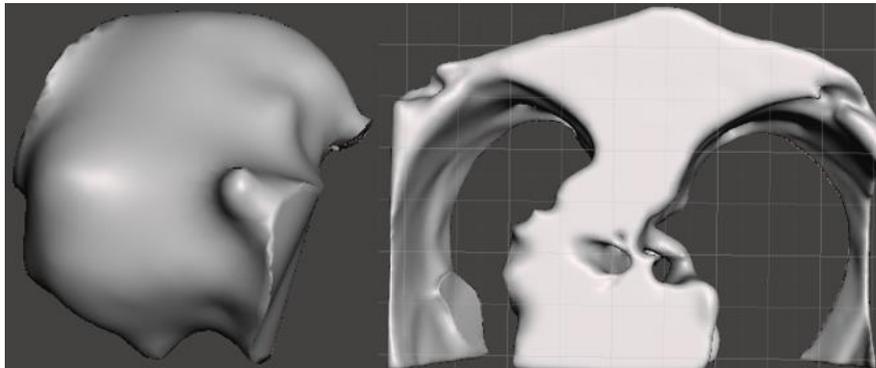
*Ilustración 76. Archivo STL original. Se encierra el tumor.*

El archivo sin editarlo y a una escala del 100% tarda cerca de 4 horas en imprimirse con un solo material. Por tal razón se decidió suavizar la superficie y eliminar los fragmentos que flotan alrededor de la estructura (Ilustración 77).



*Ilustración 77. STL suavizado en Meshmixer.*

Para imprimir con dos materiales o colores es necesario que se encuentren divididas las partes a imprimir en el STL. En el archivo original esto no era así de manera que mediante Meshmixer se procedió a separar el pulmón del tumor (Ilustración 78).

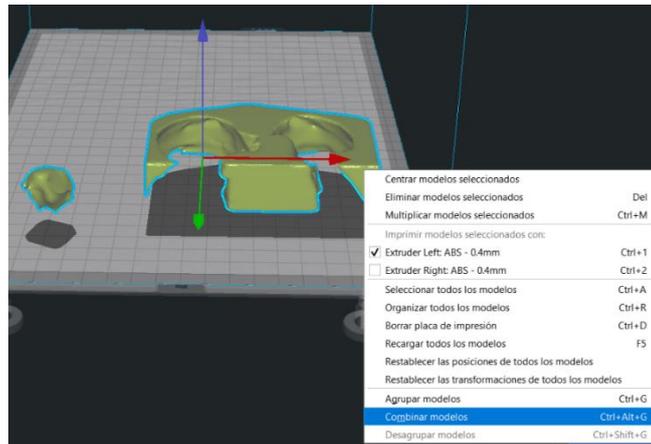


*Ilustración 78. Distinción de las partes a imprimir.*

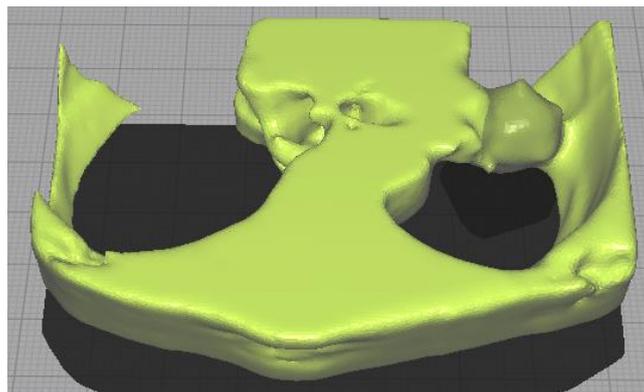
Para poder modificar los parámetros de impresión se utilizó el software BCN3D Stratos, software gratuito y con interfaz muy similar a UltimakerCura pero necesario puesto que es el único compatible para imprimir con la impresora Sigma R19.

#### **4.5.1 PRIMERA VERSIÓN**

La importancia de haber segmentado el tumor del pulmón es posteriormente indicar en Stratos el material o color correspondiente a cada parte. También mencionar que una vez cortado el STL ambas partes deben encajar perfectamente ya que Stratos las combina (Ilustración 79-80).



*Ilustración 79. Comando para combinar las piezas.*



*Ilustración 80. Piezas combinadas. Se puede diferenciar los materiales por la leve diferencia de colores.*

Adicionalmente es importante que cuando se imprima con ABS se cuente con algún tipo de cubierta para que la temperatura ambiental se mantenga constante y evitar problemas de *cracking* o *warping*. Por el contrario, cuando se imprima con PLA no se recomienda tener la cubierta puesto que las capas podrían no unirse correctamente. Sin importar el material la altura de capa en ambos extrusores debe ser la misma de lo contrario se produciría un descuadre en la doble extrusión.

Para imprimir el tumor y pulmón se utilizó ABS de distintos colores. Durante los primeros intentos se trató de imprimir la pieza completa, no obstante, a medida que la impresora extruía se notó que cuando le tocaba cambiar de extrusor los primeros segundos no salía material de la boquilla. Esto provocaba que se pierda la definición del prototipo y una base inestable para las capas posteriores. Por consiguiente, se procedió a parar la impresión.

#### **4.5.2 VERSIÓN FINAL**

Para solucionar este problema se investigó en la página oficial de BCN3D parámetros extras en la extrusión doble que tal vez no se estaban tomando en cuenta.

De esta forma se encontró un nuevo parámetro del material “temperatura en modo espera”. Este parámetro es la temperatura a la que se encuentra el extrusor que no está extruyendo. Se debe ser muy cuidadoso con esta temperatura, si es muy alta se puede comenzar a quemar el material, mientras que si es muy baja podría provocar que se tape el *nozzle*.

Una vez conocida esta variable se cortó el STL original para realizar experimentos (Ilustración 81) que requieran menor tiempo/material, variando las temperaturas de impresión, espera y velocidades.



*Ilustración 81. Impresión de prueba con ABS de distintos colores.*

Después de encontrar los parámetros correctos se procedió a imprimir la pieza completa del STL con la superficie suavizada y el STL original (Ilustración 82).



*Ilustración 82. Impresión STL suavizado (izquierda) e impresión STL original (derecha).*

Como se distingue en las imágenes, no hay mucha diferencia en cuanto a la apariencia. En cuanto al tiempo sí, el STL original tardó 2 horas y 20 minutos mientras que alisando la superficie se imprimió en 1 hora y 54 minutos. Ambos se imprimieron con los mismos parámetros de impresión.

### **4.5.3 PARÁMETROS DE IMPRESIÓN**

*Tabla 5. Parámetros de impresión para el tumor en pulmón.*

<b>Material</b>	<b>ABS</b>
-----------------	------------

Altura de capa	0.2 mm
Grosor de pared	1.6 mm
Recuento líneas de pared	4
Grosor superior/inferior	1 mm
Capas superiores	5
Capas inferiores	5
Densidad de relleno	30%
Patrón de relleno	Líneas
Temperatura de impresión	240°C
Temperatura placa de impresión	90°C
Flujo	95%
Temperatura en modo de espera	205°C
Velocidad de impresión	30 mm/s
Retroacción	Habilitada
Distancia de retroacción	5 mm
Velocidad de retroacción	45 mm/s
Refrigeración	Deshabilitada
Soporte	Habilitado
Extrusor del soporte	Extrusor izquierdo
Angulo de voladizo del soporte	60°
Densidad de soporte	20%
Tipo de adherencia a la placa de impresión	Borde
Extrusor de adherencia a la placa de impresión	Extrusor izquierdo
Escala	30%
Peso	11g
Tiempo empleado	1h 54min

#### 4.6 DISCUSIÓN

Como se puede apreciar en los casos clínicos descritos en los apartados anteriores es mucho más fácil imprimir si los archivos STL son nítidos y no contienen estructuras complejas. La nitidez es un factor importante al momento de exportar archivos DICOM. Además, es aconsejable que la base del archivo a imprimir sea plana, esto facilita la adherencia a la placa de impresión y evita la aparición de problemas como el descuadre. De ser posible otra simplificación que se puede hacer es suavizar la superficie del STL ya que durante la impresión es probable que si los detalles no están tan definidos se pierdan. Un ejemplo es el caso del tumor, donde no se encontró mucha diferencia en imprimir el STL original y el STL suavizado (Ilustración 82), no obstante, suavizando la superficie se ahorró tiempo.

Continuando con el factor tiempo la utilización de Meshmixer y configuración de parámetros de impresión ha permitido ahorrar tiempo. imprimir los riñones sin ninguna modificación a una escala del 100% hubiera tardado 24 horas, a una

escala del 50% y con la optimización realizada se consiguió imprimir la biorréplica en 1 hora y 58 minutos. La aorta abdominal realizando el vaciado y a una escala del 100% se imprimió en 2 horas y 20 minutos, en relación al STL original se ahorraron 12 minutos dado que imprimir el STL original tardaría 2 horas y 32 minutos. Imprimir el cráneo a una escala del 100% no se puede debido a que sobrepasa las dimensiones permitidas en la Ender 3, por otro lado, imprimir el cráneo a una escala del 95% sin ninguna optimización hubiera tardado 28 horas y 17 minutos, haciendo las optimizaciones e imprimiendo a una escala del 40% se logró que imprimir el biomodelo tarde 3 horas y 57 minutos. Las vértebras al ser un STL relativamente “limpio” se prefirió no suavizar la superficie, imprimirlas a una escala del 100% requería 14 horas y 56 minutos, en consecuencia, se decidió disminuir la escala al 40% y aumentar la altura de capa a 0.3 mm, de esta forma se pudo imprimir las vértebras en 2 horas y 11 minutos. Finalmente imprimir el tumor del pulmón sin ninguna modificación del STL y a una escala del 100% nos hubiera tomado 19 horas, en contrapunto, editando el STL y a una escala del 30% se logró imprimir el modelo en 2 horas y 20 minutos.

Otro factor que complica la impresión es que el STL contenga partes muy delgadas. En ocasiones por la velocidad de impresión y por la falta de adherencia en las primeras capas es probable que la impresión se descuadre en capas superiores. Lección aprendida a través de la aorta abdominal (Ilustración 63). De modo que entre más superficie tenga la base más estable será la pieza. También siempre que se quiera imprimir arterias o venas se puede realizar un vaciado con el fin de ahorrar tiempo y material.

Teniendo en cuenta que se ha usado un diámetro de *nozzle* de 0.4 mm sin ningún problema en los casos clínicos se pudo haber usado una altura de capa de 0.12 mm, las impresiones hubieran tenido un mejor aspecto, pero se ha decidido no hacerlo dado que usando una altura de 0.2 mm o 0.3 mm se encontró una buena relación calidad/tiempo. Con relación calidad/tiempo nos referimos a que se pudo haber hecho las piezas más grandes y con menos altura de capa, pero asimismo se hubiera tardado más tiempo y consumido más material no obstante con la escala elegida en cada prototipo además de ahorrar tiempo se cuenta con una rugosidad aceptable para el uso docente de las biorréplicas que demanda el hospital. Por otro lado, a veces una altura de capa muy gruesa dificulta la unión de capas en zonas con poca superficie, a manera de ejemplo se cita el cráneo (Ilustración 69).

Sin los soportes sería imposible elaborar piezas con voladizos. Deben ser optimizados para que usen poco material, sean livianos sin descuidar su función de soporte y sean fácil de quitar. Aunque esté optimizado los soportes dejan huellas, si la impresión es pequeña no importa, pero en impresiones más grandes puedes marcar una mayor área. Si se desea un mejor acabado estético es más factible imprimir la pieza por separado (Ilustración 60 B)

Las optimizaciones y cambios realizados para imprimir todos los biomodelos fueron hechas en base a un contexto de emergencia. Sin embargo, no se pudo

disminuir el tiempo de fabricación a menos de 1 hora y 58 minutos. Por lo que no se considera útil la impresión 3D en casos de emergencia de modo que los métodos tradicionales siguen siendo más efectivos en este contexto.

#### **4.6.1 COMPARACIÓN DE IMPRESORAS**

La impresora Sigma R19 es cara, es más profesional, pero al mismo tiempo más difícil de usar, sus dimensiones máximas de impresión son 42 x 29,7 x 21 cm (ancho x alto x profundidad). No se encuentra fácilmente información en internet para solucionar problemas específicos como el cambio de drivers. Asimismo, al tener dos cabezales la calibración tarda más tiempo, puede llegar a tomar 1 hora. Por el contrario, al ser más profesional se puede imprimir con más materiales ya que cuenta con una cubierta que permite mantener la temperatura ambiental constante. Su extrusión doble a parte darnos la opción de usar dos colores en una misma pieza también sirve para ahorrar tiempo al momento de realizar una producción en serie, es decir se puede imprimir una pieza en cada extrusor al mismo tiempo (Ilustración 83).



*Ilustración 83. Impresión en serie. (GOVAJU 3D Printing, 2022)*

Acerca del modelo Ender 3 se puede decir que es mucho más barato en comparación a la Sigma. Es una impresora sencilla, fácil de usar enfocada no tanto en un uso profesional sino doméstico. Sus dimensiones máximas de impresión son 30 x 34 x 30 cm (ancho x alto x profundidad). Es fácil de calibrar y hay una amplia variedad de información para solucionar problemas y aprender a usarla. Por el contrario, la impresión del ABS se complica puesto que no cuenta con una cubierta y solo tiene un cabezal de forma que no es posible la extrusión doble.

Para comenzar a imprimir se recomienda la Ender 3 por su facilidad de uso. Además, tiene una buena calidad de impresión para ser relativamente barata y las máximas dimensiones de impresión son mayores a la Sigma. Como desventaja está que no cuenta con una cubierta y no se puede realizar extrusión doble. Si el operario ya cuenta con experiencia en la fabricación aditiva se recomienda la Sigma R19, puesto que puede ser útil en más aplicaciones que la Ender 3.

#### **4.6.2 ALCANCE DE LOS CASOS DE ESTUDIO**

Para poder evaluar la utilidad de los prototipos se contactó al Doctor Boris L. Torres, cirujano del hospital. Lo que nos supo comentar es que aún es muy temprano para obtener beneficios a gran escala. El hospital cuenta solo con una impresora Ender de extrusión simple en la cual nomas es posible imprimir archivos a cierta escala y debido a que no es una impresora profesional no es factible asumir regiones anatómicas con gran volumen o complejidad.

La impresora tiene limitaciones, otra es el material. Si bien la Ender 3 es una de las impresoras más sencillas del mercado para comenzar en el mundo de la impresión 3D no es la mejor para imprimir con materiales más profesionales o sensibles como lo puede ser el ABS, ya que es muy importante que la impresora cuente con una cubierta para mantener la temperatura ambiental constante.

Otro inconveniente es que el hospital no cuenta con los conocimientos suficientes para poder optimizar los archivos STL. Como consecuencia es la UPC quien facilita dichas configuraciones y envía archivos GCODE optimizados, lo cual hace lento el proceso pues previamente se deben escoger casos donde sea factible la reconstrucción volumétrica de forma que se puedan emular con los softwares que usa la UPC para posteriormente imprimir en Cuba.

Pese a las limitaciones mencionadas la tecnología de la fabricación aditiva ha despertado mucho interés en algunas especializaciones no obstante de momento la única utilidad de los prototipos impresos ha sido en el campo docente.

## **5. FACTIBILIDAD MEDIOAMBIENTAL**

Una de las principales ventajas de la impresión 3D es que utiliza menos material que otros métodos de fabricación. Se diseña, funde y fusiona solo lo necesario para producir una pieza. Por otra parte, las tecnologías 3D son muy accesibles. Los fabricantes pueden llevar a cabo proyectos de impresión sin necesidad de acudir a un tercero, hecho que reduce los desplazamientos logísticos disminuyendo así la huella ecológica (Engineering Education, 2021).

Haciendo referencia al PLA este material se deriva de materias primas naturales y renovables como el maíz, es fácil de imprimir y no necesita de condiciones extraordinarias para brindar buenos acabados a las piezas. Por esta razón es uno de los materiales más comunes cuando se empieza en la fabricación aditiva (Lucía, 2019).

Existen ciertos fabricantes que etiquetan al PLA como biodegradable, pero esto no es así, un producto biodegradable se puede descomponer por la intervención de microorganismos, si dejamos el PLA al aire libre puede tardar 80 años para descomponerse. Lo que sí se puede afirmar del PLA es que es compostable, pero solo en una planta de compostaje industrial. Un material compostable es aquel que se biodegrada en condiciones específicas, el PLA podría biodegradarse en días o meses con temperaturas entre 55-70°C. Una vez biodegradado se convierte en compost. El compost es rico en nutrientes, se puede usar en la agricultura, jardinería, para acondicionar el suelo, como fertilizante y pesticida natural (Xicota, 2020).

Por otro lado, el PLA y otros bioplásticos no pueden biodegradarse en todas las plantas de compostaje industrial, según una encuesta de German Environmental Aid (DUH) con casi 1000 plantas de compostaje se encontró que el 95% de ellas no pueden compostar estos bioplásticos de acuerdo con estándares (Lucía, 2019).

En contraste el PLA puede ser reciclado bien recolectando el material sobrante y convirtiéndolo en nuevo material para volver a imprimir o usando estos desechos para elaborar objetos de plástico con tecnologías de inyección de molde (Bitfab, 2022).

A diferencia del PLA la materia prima del ABS se basa en combustibles fósiles, es un material más complicado de imprimir y se necesita de una cámara de impresión para mantener constante la temperatura y evitar los problemas del *warping* y *cracking*.

El ABS se puede reciclar en una unidad de reciclaje de plástico. El primer paso consiste en triturar todas las piezas de plástico, luego se trituran contaminantes como plásticos no deseados y metales, finalmente se filtran por un sistema de agua. Repitiendo este proceso el ABS se recupera y se puede mezclar con nuevo plástico ABS (Globa Plast, 2020).

A nivel de materiales se puede decir que tanto el PLA como el ABS son reciclables. Además, durante la fabricación de todos los prototipos se tuvo en cuenta gastar la menor cantidad de energía posible y material optimizando los archivos STL. A través de las citas y datos dados en los párrafos anteriores se puede concluir que este proyecto de investigación es factible medioambientalmente y de haber contaminación es mucho menor a los métodos de fabricación tradicionales.

### **5.1 IMPACTO AMBIENTAL**

El impacto ambiental del presente proyecto se centra en el material usado y la energía necesaria para llevar a cabo la elaboración de los prototipos.

Los materiales utilizados son ABS y PLA, se trata de materiales reciclables de este modo pueden ser depositados en puntos de reciclaje.

Para visualizar el consumo eléctrico se puede revisar la Tabla 12. Se debe tener en cuenta que la generación de energía eléctrica está relacionada con las emisiones de CO<sub>2</sub> siendo su factor 0,2 Kg-CO<sub>2</sub>/kWh (Nack, 2021). Eventualmente mencionar que las emisiones totales generadas por el presente proyecto corresponden a 21,94 Kg de CO<sub>2</sub>.

*Tabla 6. Consumo eléctrico para realizar el proyecto.*

Equipo	Potencia (kW)	tiempo de uso (h)	Energía consumida (kWh)	Kg CO <sub>2</sub>
PC utilizada	0,15	520,00	78,00	15,60
Ender 3	0,27	80,00	21,60	4,32
Sigma R19	0,24	42,00	10,08	2,02
		<b>TOTAL</b>	109,68	21,94

## **6. CONCLUSIONES**

Al momento de optimizar los archivos STL se tomó en cuenta tanto el tiempo de impresión como el material usado. En la gran mayoría de archivos brindados por el hospital muchas veces hubo cuerpos flotantes, estructuras internas o superficies irregulares que no formaban parte del cuerpo de interés pero que incrementaban en gran medida el material como el tiempo necesitado para imprimir. Por tal razón a través del software Meshmixer se editaron estos archivos para simplificar la pieza sin deformarla o modificar su aspecto original. Ya que no sirve de mucho que una pieza tarde 30 minutos en imprimirse si no se parece en nada a su forma inicial. Para el caso del cráneo fue algo distinto debido a que se optó por reconstruir en la medida de lo posible los espacios faltantes, de esta forma se pasó de casi 8 horas de impresión a 3 horas con 57 minutos.

Normalmente el PLA no es sensible a cambios en la temperatura ambiental, sin embargo, al parecer en piezas complejas como el cráneo suele ser más susceptible a estas variaciones si no se cuenta con una cubierta se recomienda disminuir la altura de capa a 0.2mm, que la velocidad de impresión no supere los 40 mm/s y que la velocidad de pared exterior no supere los 30 mm/s. Puede que la impresión tarde un poco más, pero al menos no fallará. Adicionalmente seleccionar un tipo de adherencia tipo borde garantiza que la base no se moverá, de esta forma se pueden evitar el fallo de descuadre que hubo al momento de imprimir la aorta abdominal.

Haciendo referencia al relleno se suele aconsejar que este no baje del 8%, pero como se ha podido demostrar dependiendo la pieza puede incluso disminuir al 3% sin que la impresión falle y ahorrando un poco más de tiempo y material.

En cuanto a los soportes, normalmente son estructuras desechables, para ahorrar material se puede aumentar el parámetro “distancia de línea de soporte” ya que está estrechamente relacionado con su densidad. Siempre se busca que un soporte pese poco y sea fácil de retirar.

Con respecto al acabado estético si una pieza necesita muchos soportes para imprimirse, se halló más recomendable imprimirla por partes puesto que de esta forma los soportes no dejan muchas marcas. Un claro ejemplo fue la elaboración de los riñones. Además, habilitar la retroacción ayuda mucho para que no quede seña cuando la impresora comienza a extruir en una nueva capa y para evitar “hilos” durante la impresión.

Adicionalmente cuando se trabaja con doble extrusión se debe tomar en cuenta el parámetro “temperatura en modo de espera” puesto que si esta es muy bajo los primeros segundos el cabezal no extruirá material mientras que si es muy alta el material puede quemarse cuando no está extruyendo.

Finalmente se puede decir que este proyecto de investigación ha sido de utilidad para evaluar las limitaciones que tiene la fabricación aditiva en el campo de la medicina las cuales se pueden resumir en dos: el tiempo para imprimir y la escala de los prototipos. Así mismo se espera que el trabajo presentado sirva como guía para las personas que deseen comenzar investigaciones similares y puedan evitar errores que se hayan podido haber cometido por la falta de experiencia. No obstante, como mencionó el Doctor Boris la fabricación aditiva es una tecnología con mucho potencial, no se la debe subestimar y tal vez en un futuro pueda reemplazar alguno de los métodos tradicionales para un procedimiento quirúrgico.

## **7. PRESUPUESTO**

El presupuesto detalla todos los costos necesarios para realizar el presente proyecto de investigación. Se puede dividir en 6 partes:

- Costo recursos humanos
- Costo de software
- Costo de material
- Costo de maquinaria
- Costo energético
- Costo de depreciación

Se incluirá los costos tanto de la fase previa como lo es la investigación, la fase experimental y la fase correspondiente al análisis de resultados. Se añadirá el costo de la investigación bibliográfica, configuración y realización de experimentos, la redacción del proyecto, el análisis de resultados y la adquisición de todas las maquinarias necesarias, materiales y softwares.

### **7.1 COSTO DE RECURSOS HUMANOS**

Se considera el costo del operario, producción, postproducción, investigación, diseño de biomodelos y configuración de parámetros de impresión, procesado de resultados, redacción del proyecto y la supervisión del tutor.

Tabla 7. Costo de recursos humanos

Descripción de la tarea	Tiempo (h)	Precio (€/h)	costo (€)
Investigación bibliográfica para el marco teórico	120	20	2400
Investigación bibliográfica para la descripción de los experimentos	60	20	1200
Configuración de parámetros de impresión	60	20	1200
Impresión prototipos y fallos	180	20	3600
Procesado de resultados	30	20	600
Redacción del proyecto	300	20	6000
Supervisión del Tutor	15	80	1200
		<b>TOTAL</b>	<b>16200</b>

### **7.2 COSTO DE SOFTWARE**

A lo largo del proyecto de investigación se usaron 3 softwares: Meshmixer, Ultimaker Cura y BCN3D Stratos. Todos de uso libre.

Tabla 8. Costo de software

Descripción	Recursos utilizados	Costo licencia (€)
Edición STL	Meshmixer	0

Edición parámetros de impresión	UltimakerCura	0
Edición parámetros de impresión	BCN3D Stratos	0
	<b>TOTAL</b>	<b>0</b>

### 7.3 COSTO DE MATERIAL

Se define como la cantidad de filamento que se usó en cada impresión. Generalmente no suele ser un coste tan elevado puesto que la mayoría de piezas impresas son huecas y la mayoría de soportes se pretende que sean aún más huecos.

Como a lo largo de este proyecto de investigación solo se trabajó con dos materiales (PLA y ABS) bastaría con conocer el precio de cada bobina.

Para el PLA se lo considerará 18.20€/750g (Filament2print, 2022) y para el ABS 17.35€/Kg (Filament2print, 2022).

Tabla 9. Costo de material

Descripción	Recursos	Cantidad	Precio (€/unidad)	Costo (€)
Material PLA	Bobina filamento PLA	2	18,2	36,4
Material ABS	Bobina filamento ABS	2	17,35	34,7
			<b>TOTAL</b>	<b>71,1</b>

### 7.4 COSTO DE MAQUINARIA

Se considera maquinaria todas las impresoras usadas. Es decir, la Ender 3 y la Sigma R19 junto con el costo de mantenimiento.

Tabla 10. Costo de maquinaria

Equipo	Costo (€)
Ender 3	210
Sigma R19	2800
Mantenimiento	50
<b>TOTAL</b>	<b>3060</b>

### 7.5 COSTO ENERGÉTICO

En la actualidad el coste del kWh varía mucho en España, por este motivo se hará la media de los valores que tuvo entre los meses enero a mayo del presente año. De esta forma el coste de la luz es 0.11€/kWh (OCU, 2022).

A lo largo de este proyecto se trabajó con dos impresoras, la Ender 3 con un consumo de 270W y la impresora BCN3D R19 con un consumo de energía de 240W (BCN 3D).

Con los datos anteriormente expuestos es posible calcular el coste por hora de impresión de cada impresora. Para la Ender sería 0.03€/h y para la Sigma 0.03€/h. Así se puede obtener el coste de la electricidad.

Tabla 11. Coste de electricidad

Equipo	Tiempo (h)	Precio (€/h)	costo (€)
Ender 3	108	0,03	3,24
Sigma R19	72	0,03	2,16
		<b>TOTAL</b>	<b>5,4</b>

## 7.6 COSTO DE DEPRECIACIÓN

Se considera la depreciación como el costo de adquirir la impresora dividido entre las horas de uso que le daremos a lo largo de toda su vida útil.

Según (Filament2print, 2022) compañía con vasta experiencia en el campo de la impresión 3D una impresora utilizada 5 horas cada día se puede llegar a amortizar en 3 años.

Dado que la impresora se la usa cada vez que el hospital la requiere y más no con una finalidad industrial podríamos suponer que al año se la utilizará 150 días.

Con respecto al costo actualmente la Ender 3 vale 210€ (Amazon, 2022) mientras que la BCN3D R9 se la puede encontrar por 2800€ (Impresora D3D, 2022).

Ecuación 1. Cálculo del costo de depreciación.

$$\text{Costo de depreciación} = \frac{\text{Precio de la impresora}}{\text{Tiempo de uso de la impresora hasta amortizarla}}$$

Seguidamente se ilustra el cálculo para hallar el costo de depreciación en cada impresora.

### Ender 3

$$\frac{210\text{€}}{3 \text{ años} * \frac{150 \text{ días}}{\text{año}} * \frac{5 \text{ horas}}{1 \text{ día}}} = 0.1\text{€/h}$$

### Sigma R19

$$\frac{2800\text{€}}{3 \text{ años} * \frac{150 \text{ días}}{\text{año}} * \frac{5 \text{ horas}}{1 \text{ día}}} = 1.24\text{€/h}$$

Finalmente se muestran los costes de depreciación para cada prototipo.

Tabla 12. Coste de depreciación.

Equipo	Tiempo (h)	Precio (€/h)	costo (€)
Ender 3	108	0,1	10,8
Sigma R19	72	1,24	89,28
		<b>TOTAL</b>	<b>100,08</b>

## 7.7 COSTO TOTAL DEL PROYECTO

De esta forma se pueden desglosar todos los costes y calcular el costo total.

Tabla 13. Costo total del proyecto

Descripción	Costo (€)
Costo de recursos humanos	16200
Costo de software	0
Costo de material	71,1
Costo maquinaria	3060
Costo electricidad	5,4
Costo de depreciación	100,08
<b>SUBTOTAL</b>	<b>19436,58</b>
IVA (12%)	2332,40
<b>TOTAL</b>	<b>21768,98</b>

Finalmente se puede concluir que el costo total del proyecto es veintiún mil setecientos sesenta y ocho con noventa y ocho céntimos.

## **8. BIBLIOGRAFÍA**

- 3Dmarket. (2022). *3Dmarket*. Obtenido de <https://www.3dmarket.mx/wp-content/uploads/2019/11/2.jpg>
- ALL3DP. (2022). Obtenido de <https://all3dp.com/2/3d-printer-retraction-speed-what-does-it-mean/>
- Amazon. (2022). *Amazon*. Obtenido de Amazon: [https://www.amazon.es/Bisofice-Impresora-precisi%C3%B3n-Autoensamblaje-curr%C3%ADculum/dp/B09CD75Q4Y/ref=sr\\_1\\_1\\_sspa?\\_\\_mk\\_es\\_ES=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crid=1QM38UYJDVMW6&keywords=ender+3&qid=1650983284&srefix=ender+3+%2Caps%2C91&sr=8-1-spons&psc](https://www.amazon.es/Bisofice-Impresora-precisi%C3%B3n-Autoensamblaje-curr%C3%ADculum/dp/B09CD75Q4Y/ref=sr_1_1_sspa?__mk_es_ES=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crid=1QM38UYJDVMW6&keywords=ender+3&qid=1650983284&srefix=ender+3+%2Caps%2C91&sr=8-1-spons&psc)
- Andrés Cano, P. (2021). Papel del cirujano ortopédico y traumatólogo en la impresión 3D: aplicaciones actuales y aspectos legales para una medicina personalizada. *Revista Española de Cirugía Ortopédica y Traumatología*, 138-151.
- AS. (25 de Abril de 2022). Precio de la luz por horas hoy, 25 de abril: cuándo es más barata y cuándo más cara. *Precio de la luz por horas hoy, 25 de abril: cuándo es más barata y cuándo más cara*. Obtenido de [https://as.com/diarios/as/2022/04/24/actualidad/1650821590\\_900575.html](https://as.com/diarios/as/2022/04/24/actualidad/1650821590_900575.html)
- Basak, S. (2021). Thermoplastic elastomers in biomedical industry – evolution and current trends. *Journal of Macromolecular Science*.
- BCN 3D. (s.f.). *Sigma R19 especificaciones*. Obtenido de <https://www.bcn3d.com/wp-content/uploads/2019/10/Datasheet-Sigma-R19-ES.pdf>
- Bitfab. (2022). *Bitfab*. Obtenido de Bitfab: <https://bitfab.io/es/blog/reciclar-plastico-impresion-3d/>
- Bucco, M. (JUNIO de 2016). Obtenido de <https://repositorio.udesa.edu.ar/jspui/bitstream/10908/11878/1/%5bP%5d%5bW%5d%20T.M.%20Ges.%20Bucco,%20Mariano.pdf>
- Cernevale, R. (2 de AGOSTO de 2010). *REDALYC*.
- César Juárez, Á., Olivos Meza, A., Landa Solís, C., Cárdenas Soria, V., Silva Bermúdez, P., Suárez Ahedo, C., . . . Ibarra, J. (2018). *SCIELO*. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/facmed/v61n6/2448-4865-facmed-61-06-43.pdf>
- Chepelev, L., Wake, N., & Ryan, J. (21 de Noviembre de 2018). *BMC, research in progress*. Obtenido de <https://doi.org/10.1186/s41205-018-0030-y>
- Craftcloud. (2022). *Craftcloud*. Obtenido de <https://all3dp.com/es/2/warping-impresion-3d-soluciones/>
- Día de la Toalla. (2021). Obtenido de <https://youtu.be/NYfYNKEILFk>
- Domínguez, I., Romero, L., Espinosa, M., & Domínguez, M. (AGOSTO de 2013). *SCIELO*. Obtenido de [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-915X2013000200004&script=sci\\_arttext&tling=e](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-915X2013000200004&script=sci_arttext&tling=e)

- Engineering Education. (4 de Junio de 2021). *Engineering Education*.
- FILAMENT2PRINT. (s.f.). Obtenido de <https://filament2print.com/es/>
- Filament2print. (2022). *Filament2print*. Obtenido de <https://filament2print.com/es/abs-basic/692-abs-basic-negro.html>
- Filament2print. (2022). *Filament2print*. Obtenido de Filament2print: [https://filament2print.com/es/pla-premium/746-pla-premium-blanco.html#/217-diametro-175\\_mm/223-formato-bobina\\_750\\_g](https://filament2print.com/es/pla-premium/746-pla-premium-blanco.html#/217-diametro-175_mm/223-formato-bobina_750_g)
- Filament2print. (2022). *Filament2print*. Obtenido de Filament2print: [https://filament2print.com/es/blog/18\\_costes-impresion-3D.html](https://filament2print.com/es/blog/18_costes-impresion-3D.html)
- Filament2print. (2022). *Filament2print*. Obtenido de [https://filament2print.com/es/blog/18\\_costes-impresion-3D.html](https://filament2print.com/es/blog/18_costes-impresion-3D.html)
- Geografía Infinita*. (2022). Obtenido de Geografía Infinita: <https://www.geografiainfinita.com/2018/12/los-paises-mas-pobres-del-mundo/>
- Globa Plast. (23 de Junio de 2020). *Globa Plast*. Obtenido de <https://globoplast.com.mx/es-reciclable-el-plastico-abs/>
- GOVAJU 3D Printing. (2022). Obtenido de <https://youtu.be/holTe1FHVUU>
- Gyrobot. (3 de JULIO de 2014). *Thingiverse*. Obtenido de <https://www.thingiverse.com/thing:380665>
- Haryńska, A. (2020). A comprehensive evaluation of flexible FDM/FFF 3D printing filament as a potential material in medical application. *European Polymer Journal*.
- Heywood, N. (17 de Diciembre de 2018). *Linked in* . Obtenido de <https://www.linkedin.com/pulse/multi-color-3d-printing-using-fusion-360-nigel-heywood>
- Ikkaro. (2022). *Ikkaro*. Obtenido de <https://www.ikkaro.com/guia-de-impresion-3d/>
- Impresora D3D. (2022). *Impresora D3D*. Obtenido de <http://impresorad3d.com/bcn3d-sigma-r19/#:~:text=El%20precio%20de%20la%20BCN3D%20Sigma%20R19%20ronda%20los%202.800%20euros.>
- Impresoras 3D. (Febrero de 2020). Obtenido de <https://w3r8z3y9.rocketcdn.me/wp-content/uploads/2020/02/esquema-atasco-boquilla-nozzle.jpg.webp>
- Inovamarket. (2022). *Inovamarket*. Obtenido de <https://www.inovamarket.com/2021/04/08/ender-3-pro/ventilador-ender-3-pro-inovamarket/>
- Instituto Madrileño de Traumatología. (2022). *Instituto Madrileño de Traumatología*. Obtenido de <https://imtra.es/que-es-el-formato-dicom/>
- Inzunza, O., Caro, I., Mondragón, G., Baeza, F., Burdiles, A., & Salgado, G. (2015). *SCIELO*. Obtenido de [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0717-95022015000300059&script=sci\\_arttext&tlng=n](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0717-95022015000300059&script=sci_arttext&tlng=n)

- Leon3D. (2022). *Leon3D*. Obtenido de <https://www.leon-3d.es/guia-de-resolucion-de-problemas/#error09>
- Lucía, C. (23 de Julio de 2019). *3Dnatives*. Obtenido de 3Dnatives.
- Nack, F. (Enero de 2021). Caracterización mecánica de un elastómero para un uso biomecánico. *Caracterización mecánica de un elastómero para un uso biomecánico*. Barcelona, Barcelona, España.
- OCU. (2022). *OCU*. Obtenido de OCU: <https://www.ocu.org/vivienda-y-energia/gas-luz/informe/precio-luz>
- Quemada Villagómez, M., Alcaraz Caracheo, L., Ruíz Mondragón, G., & Rodríguez Castro, R. (OCTUBRE de 2017). *PISTAS EDUCATIVAS*. Obtenido de <http://www.itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/pistas/article/view/885/789>
- RADIO REBELDE. (2022). *RADIO REBELDE*. Obtenido de <http://www.radiorebelde.cu/images/imagenes/ciencia/hospital-hermanos-ameijeiras-cuba-230416.jpg>
- Talent. (2022). *Talent*. Obtenido de Talent: <https://es.talent.com/salary?job=ingeniero#:~:text=El%20salario%20ingeniero%20promedio%20en,%E2%82%AC%2014%2C91%20por%20hora.>
- Varela Aldás, J. (14 de MAYO de 2020). *CIENCIAMÉRICA*. Obtenido de <http://201.159.222.118/openjournal/index.php/uti/article/view/292/439>
- Vazquez, A. (30 de Marzo de 2021). *CYSAE*. Obtenido de <https://www.cysae.com/la-impresion-3d-regulacion-normativa-y-responsabilidades/>
- Xicota, E. (13 de Enero de 2020). *Ester Xicota*. Obtenido de Ester Xicota: <https://www.esterxicota.com/diferencia-textiles-biodegradables-compostables/#:~:text=Por%20lo%20tanto%2C%20un%20producto,produce%20compost%20de%20alta%20calidad.>