



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala



**Dirección General
de Investigación**
Universidad de San Carlos de Guatemala

**Informe final de Proyecto de Investigación
DIGI-PUI-004**

Informe final de proyecto de investigación

Universidad de San Carlos de Guatemala

Dirección General de Investigación

Programa Universitario de Investigación Interdisciplinaria en Salud

Fabricación de prótesis de miembro inferior a través de impresoras 3D

Unidad avaladora: Facultad de Ciencias Médicas

4.8.63.1.99

Nombre del coordinador: José Antonio Alvarez Guillén

Guatemala, 30/10/2025



Informe final de Proyecto de Investigación

Contraportada

Autoridades de la Dirección General de Investigación

Dra. Alice Patricia Burgos Paniagua

Directora General de Investigación

M.A. Sucelly Orozco de Morales

Coordinadora del Programa Universitario de Investigación

Autores

Coordinador del proyecto: José Antonio Alvarez Guillén

Auxiliar de Investigación I: Sara Abigail Lorenzo Marroquín

Auxiliar de Investigación I: Lourdes Patricia Reyes Castillo

Auxiliar de Investigación II: Gabriel Ranferí Díaz Burgos

Auxiliar de Investigación II: Francisco Javier Zamora Hernández

Colaborador: Norman Josue Vega Obando

Colaborador: Julio César Alvarez Guillén

El contenido de este informe de investigación es responsabilidad exclusiva de sus autores.

Esta investigación fue cofinanciada con recursos del Fondo de Investigación de la DIGI de la Universidad de San Carlos de Guatemala a través de la partida presupuestaria número: 4.8.63.1.99 en el Programa Universitario de Investigación Interdisciplinaria en Salud.



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DC Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

Informe final de Proyecto de Investigación

Los autores son responsables del contenido, de las condiciones éticas y legales de la investigación desarrollada.

Este informe está licenciado bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).

Puede copiarse, distribuirse y adaptarse con la condición de dar crédito a los autores, no usarlo con fines comerciales y compartir cualquier obra derivada bajo la misma licencia.

Para más información, visite: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>.



Informe final de Proyecto de Investigación

Índice general

Índice general	1
Resumen	3
Palabras clave	3
Abstract	5
Keywords	5
1. Introducción	6
2. Contexto de la investigación	7
3. Revisión de literatura	8
6.1. Tipo de investigación	23
6.2. Enfoque y alcance de la investigación	23
6.3. Diseño de la investigación	24
6.4. Población, muestra y muestreo	24
6.5. Técnicas	25
6.6. Resumen de las variables o unidades de análisis	26
6.7. Procesamiento y análisis de la información	27
7. Aspectos éticos y legales	28
8. Resultados y discusión	28
9. Propiedad intelectual	37
10. Beneficiarios directos e indirectos	37
11. Estrategia de divulgación y difusión de los resultados	37
12. Contribución a las Prioridades Nacionales de Desarrollo (PND)	39
13. Otras contribuciones del proyecto al desarrollo	39
14. Vinculación	40
15. Conclusiones	40
16. Recomendaciones	41
Referencias	43
Apéndice	46
Declaración del coordinador del proyecto de investigación	46



Informe final de Proyecto de Investigación

Aval del Director del Área de Investigación	47
Recepción de la Dirección General de Investigación	47



Informe final de Proyecto de Investigación

Resumen

La presente investigación abordó el problema del limitado acceso a prótesis de miembro inferior en Guatemala, donde su alto costo y la centralización de la producción limitan la rehabilitación de personas amputadas. La justificación radica en que la impresión 3D (I3D) permitiría reducir costos, aumentar la disponibilidad y acercar estos dispositivos a poblaciones con menores recursos, contribuyendo a la equidad en salud. El estudio tuvo como objetivos: (1) establecer el modelado óptimo de la prótesis; (2) cuantificar la eficiencia de las impresoras 3D en su fabricación; (3) determinar su resistencia última. Para su realización se vinculó con el FabLab. Fue una investigación experimental, de enfoque cuantitativo y diseño de materiales. Se utilizaron métodos de modelado computacional, impresión 3D y ensayos mecánicos. Entre las técnicas e instrumentos empleados destacaron: softwares de modelación, escáner 3D, impresoras 3D, cronometraje digital, bases de datos y máquina universal de compresión. La información se analizó mediante estadística descriptiva. La investigación arrojó distintos prototipos, siendo los más sobresalientes: prótesis blanca (1.8 kg) requirió 3,300 minutos y 2 rollos de filamento, con un costo de Q600; mientras que la prótesis azul (2.2 kg) necesitó 4,200 minutos, 3 rollos y costó Q700. En la prueba de resistencia última, la prótesis azul alcanzó ruptura a 4,592 lb-f, mientras que la prótesis blanca soportó 1,673 lb-f con deformación significativa. Los resultados se piensan divulgar a través de artículos científicos, congresos y charlas a estudiantes. Beneficiarán concretamente a instituciones de salud, fabricantes locales, universidades y futuras fases del proyecto orientadas a pacientes amputados en Guatemala.

Palabras clave

1. Diseño de prótesis	2. Prótesis articulares	3. Prótesis e implantes	4.	5.
-----------------------	-------------------------	-------------------------	----	----



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

Informe final de Proyecto de Investigación



Informe final de Proyecto de Investigación

Abstract

This research addressed the problem of limited access to lower-limb prostheses in Guatemala, where their high cost and centralized production restrict rehabilitation opportunities for amputees. The justification lies in the fact that 3D printing (3DP) can reduce costs, increase availability, and bring these devices closer to low-income populations, contributing to equity in health. The study aimed to: (1) establish the optimal prosthesis model; (2) quantify the efficiency of 3D printers in its fabrication; and (3) determine its ultimate strength. The project was carried out in collaboration with the FabLab. It was an experimental investigation with a quantitative approach and a materials-design framework. Methods included computational modeling, 3D printing, and mechanical testing. Techniques and instruments used included modeling software, a 3D scanner, 3D printers, digital timing, databases, and a universal testing machine. Data were analyzed using descriptive statistics. The study produced several prototypes, with the most relevant being: the white prosthesis (1.8 kg), which required 3,300 minutes and 2 rolls of filament at a cost of Q600, and the blue prosthesis (2.2 kg), which required 4,200 minutes, 3 rolls of filament, and cost Q700. In the ultimate strength test, the blue prosthesis failed at 4,592 lb-f, while the white prosthesis withstood 1,673 lb-f before showing significant deformation. The results are intended to be disseminated through scientific articles, conferences, and lectures for students. They will benefit health institutions, local manufacturers, universities, and future phases of the project aimed at amputee patients in Guatemala.

Keywords

1. Prosthesis design	2. Articulated prostheses	3. Prostheses and implants	4.	5.
----------------------	---------------------------	----------------------------	----	----



Informe final de Proyecto de Investigación

1. Introducción

En Guatemala, más de la mitad de la población posee algún nivel de pobreza y discapacidad lo que dificulta el acceso a una salud integral (Instituto Nacional de Estadística [INE], n.d.).

Por otro lado, se encuentra la población que sí tiene una entrada económica estable, pero su salario es inferior a los quinientos dólares mensuales (Ministerio de Trabajo y Previsión Social, 2022).

En el marco del aseguramiento de la salud integral de la población guatemalteca, la adquisición de prótesis es uno de los aspectos a considerar, sin embargo, para conseguirlo es necesario contar con una entrada económica estable y que supere el salario mínimo de Guatemala, ya que los precios en el mercado superan muchas veces los mil dólares, y los usuarios frecuentemente tienden a realizar la compra por plazos, lo que dificulta aún más el acceso para la población (Plaza pública, 2019).

Así mismo, en centros asistenciales como el *Hospital General San Juan de Dios* (HGSJDD) se documentó que, en 4 años, se realizaron más de 500 amputaciones (Ebensperger & Méndez, 2018), considerando que el hospital nacional atiende principalmente a personas de estratos económicos bajos y medios, puede comprenderse la dificultad en la adquisición de prótesis por parte de los pacientes.

En el caso de los hospitales del interior del país, se documentó que del año 2017 al 2021 fueron atendidas más de 2,000 casos por amputaciones (Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social, 2022).

Este problema se agrava por la distancia de los centros hospitalarios del interior de la república a la ciudad capital, principal lugar donde se encuentran dichos productos.



Informe final de Proyecto de Investigación

Con la finalidad de disminuir la brecha económica que dificulta el acceso a los productos de salud a la población, se han destinado recursos tecnológicos para la fabricación de prótesis, como en el caso del uso de las impresoras 3D (I3D) (Lal & Patralekh, 2018).

Investigadores como Manero y colaboradores (2019) resaltan que el uso de I3D mejora el acceso, distribución, disponibilidad y costos en materiales médicos, logrando un impacto en las familias de escasos recursos.

La calidad de prótesis fabricadas en I3D es igual a las existentes en el mercado, por lo que la fabricación en estos dispositivos disminuye el costo (MacLeod et al., 2020; Wu et al., 2020).

Por lo expuesto anteriormente, el objetivo general de esta investigación fue describir el proceso de fabricación de prótesis humanas a través de I3D, durante los meses de febrero a noviembre del 2,025, para lo cual, se formularon los siguientes objetivos específicos:

1. Establecer el modelado óptimo de la prótesis.
2. Cuantificar la eficiencia de la I3D en la fabricación de la prótesis.
3. Determinar la resistencia última de la prótesis.

Para dar respuesta a dichos objetivos se planteó un estudio de tipo *cuantitativo de diseño de materiales y de costos*

2. Contexto de la investigación

Delimitación temporal:

Fue de febrero a octubre del año 2,025.

Delimitación espacial:



Informe final de Proyecto de Investigación

La delimitación espacial en cuanto al establecimiento y uso de I3D fue en las instalaciones del FABLAB de la Dirección General de Investigación de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC).

Beneficiarios indirectos:

En esta primera fase del proyecto, no se contó con beneficiarios directos, debido a que la investigación se centró exclusivamente en la fabricación, modelado y evaluación mecánica de prótesis de miembro inferior mediante impresión 3D, sin intervención en seres humanos. Sin embargo, la población beneficiada de manera indirecta corresponde principalmente a personas amputadas en Guatemala, especialmente aquellas pertenecientes a estratos socioeconómicos bajos que enfrenten barreras económicas para adquirir una prótesis convencional, cuyos costos superan los mil dólares (Plaza Pública, 2019). Asimismo, instituciones como hospitales públicos, centros de rehabilitación y organizaciones no gubernamentales dedicadas al apoyo de personas con discapacidad podrían ser beneficiarios indirectos al contar con alternativas tecnológicas más accesibles para asistencia ortopédica.

3. Revisión de literatura

Explique los antecedentes científicos del fenómeno que investigó, los diseños que se han empleado en estudios similares y con mayor énfasis el que utilizó en la investigación ejecutada en el 2024. Debe contener antecedentes y actualizado el estado del arte (Incluir citas). Se espera que esta parte esté más fortalecida y desarrollada, con relación a lo que presentó en la propuesta inicial.

La aplicación de tecnología moderna en el campo de la salud es necesaria para mejorar la calidad de vida de las personas, Boyaci indica la implementación del uso de nueva tecnología como es el caso de la Realidad Aumentada (RA), para contribuir en la educación de médicos



Informe final de Proyecto de Investigación

cirujanos, ya que se ha comprobado que entrenamientos en RA se han asociado a menores tasas de error en sala de operaciones (Boyaci et al., 2020). Por lo que la necesidad de implementar nuevas herramientas y estrategias en el campo de salud es de suma importancia.

Por otro lado, de una revisión sistemática se documentó que la inclusión de nueva tecnología como las I3D, ha hecho que se facilite la fabricación personalizada de: (a) implantes; (b) yesos; (c) ortesis y (d) prótesis, entre otros (Lal & Patralekh, 2018). La individualización de materiales permite una mejor adaptación a la anatomía de cada individuo, además, facilita que médicos obtengan el equipo sin contratiempos (Lal & Patralekh, 2018).

Manero resalta que la fabricación a través de I3D mejora el acceso, distribución, disponibilidad y costos de los materiales médicos, logrando un impacto a nivel mundial, especialmente para las familias de escasos recursos (Manero et al., 2019).

Así mismo, Cuéllar en el año 2,019 indicó que en países en desarrollo el acceso de ciertos materiales como las prótesis en personas amputadas es limitado; Cuéllar reafirma que las I3D aumentan la accesibilidad de material ortopédico por lo económico de las impresiones, considerándolo una buena opción en países en desarrollo (Cuellar et al., 2019).

Valenzuela al igual que Zuniga hacen énfasis en la velocidad y costos de fabricación, ya que permite que se fabriquen una gran variedad de dispositivos médicos con tiempos reducidos (Valenzuela-Villela et al., 2020; Zuniga et al., 2017).

Por último, MacLeod notificó que la creación de roscas para placas de bloqueo en I3D fueron similares a las creadas con métodos tradicionales y que se encuentran de venta en el mercado (MacLeod et al., 2020).

3.1 Propiedades del material en I3D

Las prótesis son definidas por la Real Academia Española (RAE) como: “Pieza o aparato empleados para sustituir un órgano o un miembro del cuerpo” (Real Academia Española, n.d.).



Informe final de Proyecto de Investigación

La creación de prótesis se puede realizar a través de varios métodos y aparatos, siendo uno de estos aparatos la I3D; las impresiones en I3D se logran generalmente a través de biotintas o filamentos, creándose en base a materiales poliméricos naturales y sintéticos; sin embargo, también es posible lograr impresiones a través de materiales basados en metales y cerámicos (Valenzuela-Villela et al., 2020).

Dentro de los materiales cerámicos se encuentra el fosfato de calcio y para los metales se encuentra el acero con o sin aleación con materiales como el cromo con cobre, magnesio y hierro; sin embargo, para ambos casos se encuentran limitaciones como es el caso de aglutinación en el químico en el caso de los materiales cerámicos y en el caso de los metales puede producir toxicidad y aleaciones del material, a la vez que el uso de estos materiales son muy específicos, sofisticados y costosos, por lo que no se encuentran distribuidas libremente en el mercado (Valenzuela-Villela et al., 2020).

Para la elaboración de un dispositivo médico, los materiales deben presentar ciertas propiedades como la capacidad de procesarse a temperatura ambiente, que se impriman con rebordes y contar con un grado de control de la microestructura (Valenzuela-Villela et al., 2020).

En contraste, el método de creación o incrustación de diferentes materiales en las impresiones se traduciría en alteraciones en las propiedades físicas de esta.

Por ejemplo, se ha descrito que la silicona posee una vida útil corta, además, que se ensucia rápidamente, y puede fisurarse al levantar objetos pesados. Por lo tanto, las soluciones deben plantearse según las necesidades de cada paciente, según el sitio de las amputaciones sufridas (Alvial et al., 2017).

Los materiales deben ser evaluados a través de esfuerzos que se puedan conceptualizar, como la reacción que experimenta un elemento ante un estímulo de fuerza externa o interna, generalmente las fuerzas internas son reacciones químicas que pueden suceder dentro del material (Pytel et al., 1994).

Informe final de Proyecto de Investigación

Los esfuerzos se pueden dividir en tres tipos básicos: tensión, compresión y corte; el resto de los esfuerzos que se indican en la literatura son una derivación o combinación de los tres básicos como es el caso de la flexión (Pytel et al., 1994).

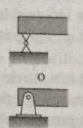
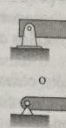
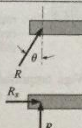
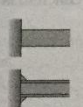
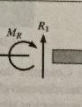
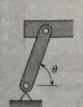
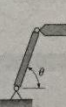
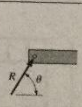
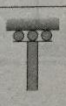
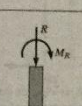
A causa de esto, los elementos estructurales se pueden clasificar según los esfuerzos que estos estén resistiendo, los más comunes son: a) elemento barra, los cuales no soportan momentos o torques; b) elemento viga, el cual es un elemento barra, pero con la capacidad de resistir momentos o torques; c) elemento columna, el cual soporta esfuerzos de flexo-compresión y; d) elemento tipo placa, el cual puede soportar esfuerzos fuera del plano de coordenadas (McGuire et al., 1982).

Por lo que se refiere a la rigidez, el elemento de modelado y la adición de materiales en áreas específicas puede llegar a alterar la matriz, un correcto modelo 3D y simulación de esfuerzos puede señalar posibilidades de concentración de esfuerzos y allí reforzarlo (McGuire et al., 1982).

Dicha alteración en la matriz por cambios en la rigidez puede significar cambios en la estabilidad de la estructura, lo que a la vez puede conllevar cambios en la resistencia de cargas (McGuire et al., 1982; Pytel et al., 1994). En la figura 3.1 se puede ver una imagen con la idealización de apoyos en estructuras; cada tipo de apoyo es una idealización de la realidad que puede simplificar los valores de frontera durante la simulación de esfuerzos.

Figura 3.1 Idealización de apoyos

Informe final de Proyecto de Investigación

Tipo	Esquema	Símbolo	Movimientos permitidos y no permitidos	Fuerzas reactivas	Incógnitas generadas
a) Apoyo articulado			No permitidos: traslación horizontal y vertical Permitidos: rotación	Una única fuerza lineal de dirección desconocida o en forma equivalente Una fuerza horizontal y una fuerza vertical que son las componentes de una fuerza única de dirección desconocida	
b) Articulación			No permitidos: desplazamiento relativo de los extremos de los miembros Permitidos: desplazamientos vertical, horizontal y rotación	Fuerzas verticales y horizontales iguales de sentido opuesto	
c) Apoyo simple			No permitidos: traslación vertical Permitidos: traslación horizontal, rotación	Una fuerza lineal única (hacia arriba o hacia abajo)*	
d) Balancín					
e) Apoyo de neopreno					
f) Empotramiento			No permitidos: traslación vertical y horizontal, rotación Permitidos: ninguno	Componentes horizontal y vertical de una resultante lineal; momento	
g) Barra doblamiento articulada			No permitidos: traslación en la dirección de la barra Permitidos: traslación perpendicular a la barra, rotación	Una fuerza lineal única en la dirección de la barra	
h) Empotramiento deslizando			No permitidos: traslación vertical, rotación Permitidos: traslación horizontal	Una fuerza lineal vertical única; momento	

Fuente: Resistencia de materiales (Pytel et al., 1994)

Para una persona que no pertenece a la rama de la ingeniería, los términos empleados anteriormente pueden resultar complejos, por lo cual existen normativos en el mercado que evalúan un mínimo exigido en la fabricación, con el fin de que estructuras mantengan las exigencias mínimas; dentro de esta normativa se encuentra: La Normativa de Seguridad Estructural 2 (NSE2) (Agies, n.d.). Dicha normativa puede dar valores en cuanto a cargas y posibilidad de combinarlas.

De manera sintética, la NSE2 indica que al existir incertidumbre en las cargas repentinas de impacto se puede multiplicar por un coeficiente del 33 %, lo que hace que el aumento del



Informe final de Proyecto de Investigación

requerimiento de resistencia del elemento sea mayor, evitando de esta manera accidentes por cargas repentinas conocidas como cargas de pulso (Agies, n.d.).

Además, en dicha norma se indica que es válido poder idealizar cargas vivas, colocándolas de manera distribuida o concentrada según se requiera someter en la estructura (Agies, n.d.). Por lo que, aunque la NSE2, no se creó para la evaluación de material en I3D, los requerimientos indicados en esta se podrían extrapolar en la fabricación de materiales de menor escala.

Por último, según lo indicado por Alvial, es necesario la estandarización de una técnica de fabricación de materiales de I3D la cual no existe actualmente en el mercado (Alvial et al., 2017)

3.2 Modelado a través de I3D

Según lo indicado por César-Juárez en los Medical Subject Headings (MESH) las I3D se definen como “un conjunto de procesos usados para realizar un objeto físico tridimensional, también conocido como «prototipado rápido»” (César-Juárez et al., 2018).

Por lo cual, las I3D son una herramienta que permiten mediante un programa de impresión especial, construir un modelo de lo virtual a lo tangible. Para esto es necesario convertir el diseño o modelo a un formato (“idioma”) que sea conocido por la impresora, a partir de este idioma, la impresora ejecuta los comandos para la construcción de cualquier modelo, en coordenadas milimétricas englobadas en el espacio de impresión conforme a los ejes “X”, “Y” y “Z” (César-Juárez et al., 2018).

La versatilidad de las I3D en diferentes campos de las ciencias, han hecho que se expandan en los últimos años, siendo una de estas la medicina, esto debido a su capacidad de crear diversos materiales que van desde lo quirúrgico hasta lo biológico (César-Juárez et al., 2018).

Por otro lado, para la creación de material en las I3D, existen varios métodos, uno de estos es la técnica de elementos finitos, la cual consiste en la simulación de las piezas, lo que

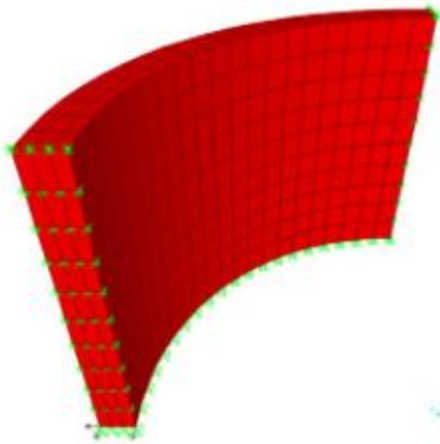
Informe final de Proyecto de Investigación

permite la creación de una malla ficticia para el cálculo de los esfuerzos de las piezas (Hurtado, 2013; Pytel et al., 1994).

Cabe mencionar, que los métodos de producción se basan en elementos sustractivos, esto quiere decir, que generan formas a través de la eliminación de exceso de material, proporcionando un ahorro de recursos al usar estrictamente solo el material que se requiere para la fabricación de una pieza impresa (Ortiz et al., 2016).

Otra técnica es la técnica de elementos finitos consiste en la creación de pequeñas figuras geométricas que se analizan por medio de matrices de rigidez y del área correspondida, lo que permite transmitir los esfuerzos a cada borde, lo que permite la transmisión de esfuerzos entre ellas (Hurtado, 2013; Pytel et al., 1994). En la figura 3.2 se coloca un modelado con elementos finitos a través del software.

Figura 3.2 Modelado con de elementos finitos



Fuente: elaboración propia utilizando software Sap 2000.

Para lo indicado, las I3D requieren de un modelo, el cual es la representación digital de lo que se planea imprimir, dicho modelado se realiza a través de programas computarizados (César-Juárez et al., 2018).

Informe final de Proyecto de Investigación

Por lo tanto, para la transmisión de los esfuerzos se debe conocer los elementos de borde y de estabilidad de la estructura, ya que la inestabilidad podría repercutir en la rigidez del material. Por lo que la creación de mallados finos permite un aumento en la certeza de los cálculos en proporción al número de figuras obtenidas ellas (Hurtado, 2013; Pytel et al., 1994).

3.1.1 Modelado y diseños de prótesis en I3D en el campo

La impresión 3D se realiza a partir de un archivo cuya base estructural es un modelo tridimensional virtual viable, por lo cual hacen necesarios estudios de imagen (en el caso de pacientes en el campo médico), con el fin de crear una impresión a la medida (César-Juárez et al., 2018).

Conviene subrayar, que a pesar de lo mencionado anteriormente, las I3D poseen limitaciones como: a) en la creación de las dimensiones del objeto a imprimir, b) los tiempos de fabricación y c) costos de adquisición; la I3D sólo puede aplicarse a estructuras que no excedan ciertas dimensiones ya que las impresoras no son capaces de producir modelos mayores a los de su diámetro (César-Juárez et al., 2018).

La dimensión del objeto en varias ocasiones es una limitación para las I3D, ya que no existe una forma concreta en el procesado de los materiales de ensamblaje (César-Juárez et al., 2018). Así mismo, la creación de materiales pequeños puede provocar inestabilidad en las uniones y una fundición de estos, podría llegar a que el material se fracture de manera repentina.

En definitiva, los modelados permiten a las I3D la creación de dispositivos médicos como lo son las prótesis, órtesis, material quirúrgico, entre otros, siendo para los efectos de este trabajo de investigación lo abarcado por la prótesis.

3.3 Eficiencia en la fabricación de impresoras 3D

Según la RAE, define la eficiencia como: “Capacidad de disponer de alguien o de algo para conseguir un efecto determinado” (Real Academia Española, n.d.).



Informe final de Proyecto de Investigación

Por lo tanto, se espera que con este trabajo de investigación, se disponga de un material que supla las necesidades futuras de las personas amputadas, con una calidad en los materiales que no sea inferior a las prótesis que actualmente se encuentran en el mercado.

Alvial en una prótesis que creó, indicó un tiempo de creación de alrededor de 3.5 horas, con un costo de los materiales inferiores a 4.00 dólares americanos, con un costo de la impresora de 900.00 dólares, igualmente americanos; la impresora usada por Alvial fue una Creator 2014 (Alvial et al., 2017).

Los tiempos, materiales y costos que se empleen en otras impresoras no están descritos para creaciones de I3D, así mismo, las complicaciones más frecuentes en la fabricación de estas como pudiera ser taponamiento de la boquilla.

Así mismo, indicó mejoras en el rendimiento cuando se utilizan I3D incrustadas en silicona, pero a pesar de ello para el paciente no fue posible levantar objetos grandes y pesados por lo que resaltó el diseño simple por sobre el sofisticado por ser más útiles y robustos (Alvial et al., 2017).

Dicha productividad, fue ejemplificada por la realización de actividades tanto laborales como cotidianas, que consistían en abrir bolsas de plástico y clavar un clavo. Cabe resaltar que la impresión de prótesis creada por Alvial fue de una amputación parcial de mano (Alvial et al., 2017). Por lo que dicha eficiencia del producto se remite a las necesidades de cada miembro y de lo que desea la persona para una adecuada calidad de vida.

En Guatemala, se distribuyen impresoras como la Sidewinder X1 (SW-X1) la cual se recomienda por el proveedor por su facilidad de su uso, calidad de impresión y precio, haciendo que sea la de mayor demanda en Guatemala (Creativo 3D, n.d.).

Dicha impresora funciona con un software de código abierto del tipo Cura, repetier-host y simplify3d lo que facilita su manejo informático (Creativo 3D, n.d.).

Así mismo, utiliza distintos materiales para la impresión en base a filamentos, como: PLA, ABS, PETG, madera, nailon, fibra de carbono, bronce y cobre, entre otros.



Informe final de Proyecto de Investigación

Sin embargo, a pesar de que la SW-X1 es una I3D de amplio uso en el mercado, no se ha utilizado específicamente en la creación de materiales como prótesis, por lo que evaluaciones del material permitirá evaluar la calidad del producto creado y de ser posible, la comparación con las prótesis convencionales.

4. Planteamiento del problema

Indique con claridad la brecha de conocimiento que identificó, puede ampliarla, fundamente la revisión de literatura que realizó antes, durante y después de haber realizado la investigación. Anote con claridad que se investigó y lo más importante para quién se investigó o grupo social, económico, académico o cultural que se benefició. En este apartado anote las preguntas de investigación (Incluir citas).

En Guatemala, el *Instituto Nacional de Estadística* (INE) para el año 2,014 refiere que a nivel nacional existe un 59.3 % de pobreza general total (Instituto Nacional de Estadística [INE], n.d.). Más de la mitad de la población posee algún nivel de pobreza por lo que el acceso a fármacos y equipo de salud es difícil.

Además, en el censo realizado para el año 2,018 se reportó dificultades en el funcionamiento físico de personas mayores de 4 años, se documentó que 1,408,736 personas tenían al menos 1 discapacidad, siendo la más predominante los problemas de visión con 947,791 personas, seguida de dificultad al caminar con 459,956 personas afectadas ([INE], 2019b).

Los primeros 3 departamentos en donde se ubicaron el mayor porcentaje de personas con al menos una dificultad fueron: a) Guatemala con 13.7 %; b) Sacatepéquez con 12.2 % y c) Santa Rosa con 12.1 % ([INE], 2019b).

Por otra parte, Plaza Pública indica que el costo de las prótesis para una pierna puede oscilar entre los Q. 10,000.00 a Q. 11,000.00, la dificultad en acceder a estos precios para la mayoría de la población no permite que los pacientes lleguen a acceder a una (Plaza pública, 2019).

Informe final de Proyecto de Investigación

Las personas que tienen una entrada económica estable y que obtienen el salario mínimo, difícilmente obtendrían una prótesis ya que, según lo estipulado por el estado, el salario mínimo que incluye la bonificación es de: a) agrícola Q. 3,122.55; b) no agrícola Q. 3,209.24 y c) exportadora y maquila Q. 2,954.35 (Ministerio de Trabajo y Previsión Social, 2022).

El INE también indica que del total de población ocupada 6,935,863 el 5,422,453 no cuentan con seguro social, así mismo, indica que el promedio mensual de ingresos en quetzales para el sector informal es de Q. 1,688 ([INE], 2019a).

Otro factor importante que influye en la adquisición de prótesis son las distancias de los centros hospitalarios del interior del país, hacia la ciudad capital, se puede observar a través de la página web de google maps, que los centros más lejanos son: (a) Hospital de la Amistad (Izabal) a 292 kilómetros (km); (b) Hospital Distrital Barillas (Huehuetenango) a 414 km y (c) Hospital de Melchor de Mencos (Petén) a 498 km.

Aunado a esto, *Range Of Motion Project -ROMP-* (2021) citando a la Organización Mundial de la Salud -OMS- (2018) indica que 9 de cada 10 personas no poseen acceso a dispositivos tecnológicos como prótesis, entre las principales causas se encuentran: altos costos, poca conciencia de fabricantes y distribuidores, falta de disponibilidad, ausencia de políticas gubernamentales, poco financiamiento y limitado personal entrenado (*Range of Motion Project*, 2021).

En una encuesta de evaluación de los servicios públicos básicos por parte del INE, informa que el 55.7 % de las personas encuestadas ha pagado un servicio de salud privado, esto debido a la precariedad de los servicios de salud del sistema público ([INE], 2020).

Ebensperger & Méndez (2018) indican en su estudio que en los años 2,012 al 2,016 en el HGSJDD se documentó un total de 870 amputaciones, dicho número da una noción sobre la cantidad de pacientes que necesitan prótesis en un periodo de tiempo. Por encima del número de personas caracterizadas en dicho estudio se debe agregar el impacto hacia el grupo familiar del paciente (Ebensperger & Méndez, 2018).



Informe final de Proyecto de Investigación

En el caso de los hospitales del interior de la república el *Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social* (MSPAS) a través de la sección de información pública reportó que durante los años 2017 al 2021 se documentaron 2,579 amputaciones, siendo los hospitales que mayoritariamente realizaron las amputaciones Hospital Regional Dr Antonio Penado y Hospital Distrital Fray Bartolome de las casas en Alta Verapaz (Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social, 2022).

El principal miembro amputado es la mano, con un 40.78 % del total de miembros amputados (Ebensperger & Méndez, 2018).

Por el contrario, ROMP (2021) reporta que la mayoría de los pacientes atendidos para la entrega de prótesis y órtesis han sido para casos de amputación superior a la rodilla, siendo un 64 % del total de los pacientes atendidos (Range of Motion Project, 2021).

Durante la ejecución de la investigación se profundizó en la evaluación de materiales, modelado computacional y procesos de ensamblaje, identificándose nuevamente la falta de lineamientos para la fabricación de prótesis modulares de extremidad inferior a través de I3D. Aunque existen reportes de prótesis impresas para mano, brazo o estructuras óseas pequeñas, los estudios sobre prótesis de miembro inferior completan son escasos y no abordan detalladamente la resistencia última ni la eficiencia productiva en condiciones reales de impresión (Zuniga et al., 2017; Wu et al., 2020). Esta situación refuerza la importancia de desarrollar procesos estandarizados que permitan trasladar estos dispositivos hacia fases clínicas futuras.

La investigación se orientó a responder estas limitaciones, dirigiéndose principalmente hacia la población guatemalteca con amputaciones de miembro inferior, un grupo social y económicamente vulnerable debido al alto costo de las prótesis comerciales y a la ausencia de programas públicos amplios de rehabilitación. Aunque en esta fase no se trabajó con pacientes, los resultados benefician de forma indirecta a personas amputadas, al sector académico y a instituciones de salud que podrían emplear estos modelos en futuras aplicaciones clínicas. De esta manera, el estudio proporciona evidencia relevante para el



Informe final de Proyecto de Investigación

diseño, producción y evaluación inicial de prótesis impresas en 3D adaptadas al medio guatemalteco.

Por lo anteriormente expuesto es preciso responder a las interrogantes:

General:

1. ¿Cuál es el proceso de fabricación de prótesis de miembro inferior través de I3D *en el Centro Universitario Metropolitano*, durante los meses de febrero a noviembre del 2025?

Específicas:

- 1.¿Cuál es el modelado óptimo de la prótesis?
- 2.¿Cuánto es la eficiencia de la I3D en la fabricación de la prótesis?
3. ¿Cuál es la resistencia última de la prótesis?

5. Objetivos

General:

1. Determinar el proceso de fabricación de prótesis de miembro inferior a través de I3D en el Centro Universitario Metropolitano, durante los meses de febrero a noviembre del 2025.

Específicos:

1. Establecer el modelado óptimo de la prótesis.
2. Cuantificar la eficiencia de la I3D en la fabricación de prótesis.
3. Determinar la resistencia última de la prótesis.



Informe final de Proyecto de Investigación

6. Hipótesis (si aplica)

No aplica.

7. Método

A manera de un entendimiento general se planteó el siguiente método:

- a) Posterior a conocer las propiedades mecánicas estipuladas en la teoría de los filamentos, se procedió a la creación y modelación matemática de las prótesis, a través de programas computacionales y así evaluar el modelado óptimo. De esta manera se detectaron zonas críticas en la prótesis, dicho modelado, permitió ajustar el código de la I3D para la creación de la prótesis y la unión. Lo indicado en este apartado sobre el modelado computacional arrojó valores que fueron enteramente teóricos.
- b) Luego de la modelación y ajustado el código de la I3D se procedió a crear la prótesis y sus uniones. Junto a la creación, se midió la eficiencia en dicha fabricación (lo que incluyó: tiempo en la fabricación, costo total de la fabricación, volumen de la prótesis y filamento total utilizado).
- c) Como último paso, se sometió la prótesis y unión a una fuerza de compresión para que esta se rompa y así comparar el valor real (rompimiento) con el teórico (modelado). La finalidad de emplear un modelado previamente en comparación con el sometimiento de una compresión real es por cuestiones de costos, ya que no es productivo someter el total de las prótesis a pruebas de compresión.

Para la realización de los pasos previamente indicados se solicitó el apoyo del Fabrication Laboratory (FabLab) de la USAC. A continuación, se explica más detalladamente los apartados anteriores sobre el método:



Informe final de Proyecto de Investigación

Objetivo específico 1: establecer el modelado óptimo de la prótesis.

Descripción específica: los datos reportados en los laboratorios fueron ingresados en un software y de esta manera se realizó un modelado computacional óptimo de la prótesis; dicho modelado matemático (del tipo matricial) se realizó en softwares específicos de modelado.

El fin del establecimiento de un modelado matemático es debido a funciones y costos en la prótesis; siendo en el caso de la función, la determinación de puntos críticos de quiebre, lo cual permitió ajustar el código de la I3D y de esta manera reajustar los parámetros en la impresión, reforzando el material en dichos puntos o por otro lado, reajustar la impresión general para reacomodar las cargas que llegase a soportar la prótesis.

El sometimiento de las fuerzas de compresión (ver la sección de Apéndices para el informe), fueron de dos prótesis, una sin puntos de unión y otra con puntos de unión, en dicho informe se muestra la fuerza de compresión, así como el video cuando fueron sometidas a dicha fuerza.

En algunos casos las partes de la prótesis fueron sometidas a más de una impresión, esto es debido al tamaño efectivo de impresión de la I3D.

La fabricación por segmentos indicada en el párrafo anterior hizo necesaria que las piezas sean ensambladas a través de uniones para lo cual se planteó al igual que en el caso de la prótesis el realizar un modelado matemático a través de un software y de esta manera probar diferentes tipos de uniones para determinar la que ofrece mayor desempeño, con el fin de que la prótesis poseyera un diseño modular con la que no se vea sacrificada su capacidad física de carga de peso.

No se contaron con prótesis existentes en el mercado para realizar el escaneo de algunas de estas, sin embargo, se realizaron 2 visitas al IGSS a la sección de fabricación de prótesis para recibir retroalimentación del diseño realizado, siendo únicamente posible por cuestiones de tiempo la visualización de los diseños actuales.

Objetivo específico 2: cuantificar la eficiencia de la I3D en la fabricación de la prótesis.

Informe final de Proyecto de Investigación

Descripción específica: posterior a la determinación del modelado computacional óptimo se crearon prótesis y uniones, ajustando los parámetros de las I3D, para valoración del total de prótesis creadas.

Para lo cual se cuantificaron los costos y desempeño en cada una de las prótesis que se crearon. La información concerniente a dicho objetivo tuvo como finalidad, la cuantificación de la eficiencia y producción de las I3D en la creación de prótesis.

Objetivo específico 3: determinar la resistencia última de la prótesis.

Descripción específica: La determinación de la fuerza de compresión proporcionó resultados sobre la resistencia máxima de las prótesis (punto máximo de soporte de peso), la valoración real de dicha fuerza que soportó la prótesis tiene como fin verificar que los modelos computacionales propuestos sean los adecuados, así mismo, que la carga de servicio de las prótesis haya sido la adecuada durante su vida útil.

La determinación de la resistencia máxima del peso de las prótesis hizo que la prótesis se fracture en el primer caso en los que no existieron puntos de unión y en el caso del segundo hizo que se deformara, esto, las inutilizó.

Al igual que en el diseño de construcción de edificios o puentes, se espera que las prótesis posean una resistencia mayor a la esperada, ya que dicho valor superior de resistencia proporcionó un margen de seguridad para el futuro paciente que la utilice.

7.1. Tipo de investigación.

Investigación experimental: esto debido a que se obtuvieron nuevos conocimientos secundarios a la fabricación de las prótesis, aplicando conocimientos ya descritos en la literatura contextualizados al medio guatemalteco.

7.2. Enfoque y alcance de la investigación.



Informe final de Proyecto de Investigación

Cuantitativo, diseño de materiales.

7.3. Diseño de la investigación.

Se realizó un diseño del tipo experimental, en la cual se pretendió realizar distintos modelos de prótesis, los cuales secundario a su realización se les asignó un identificador.

Debido a que es un experimento que se realizó en una primera instancia en la USAC, no se puede ser concreto en el número de réplicas que se realizaron ya que esto dependió de situaciones como la funcionalidad, la resistencia de materiales y la optimización en el modelo computacional que proporcionaron valores teóricos más adecuados. Sin embargo, se fabricaron alrededor de 12 prótesis, siendo sometidas a compresión únicamente a 2, esto debido a que, dentro del campo de la ingeniería estructural, los valores entre diseños no deberían de arrojar una diferencia de variabilidad en su estructura; si en tal caso los valores muestran una diferencia significativa en su variabilidad se desecharía el modelo y se iniciaría nuevamente un modelado distinto al utilizado.

La razón de las elecciones de prótesis para sometimiento de las fuerzas de presión, se debieron a los diseños en la etapa intermedia que no poseyeron uniones y que a la vez, estaba realizada con el máximo de material impreso y la siguiente fue la que poseía uniones pero que poseía un diseño de materiales inferior al primer diseño. Esto con el fin de evaluar el peso máximo que era capaz de someter a la pieza sin romperse.

7.4. Población, muestra y muestreo.

Muestra y muestreo: no se aplicó un cálculo de muestra, ni muestreo se tomaron los diseños intermedios y final con unión y con un porcentaje de relleno del 30% y la que no poseía unión que tenía un relleno del 100%.



Informe final de Proyecto de Investigación

Criterios de elegibilidad:

Criterios de selección	Criterios de exclusión
• Creación de prótesis en el tiempo indicado. • Rollos de filamento proporcionados por distribuidores autorizados	• Rollos de filamentos con deterioro previo a su uso. • Prótesis que muestren desperfectos durante su creación. • Problemas técnicos durante la creación de la prótesis, como, por ejemplo: cortes de luz a mitad de la creación.

7.5. Técnicas.

Se utilizaron 2 tipos de instrumentos: a) físicos (incluyeron las impresoras, filamentos y máquina universal) y b) documentales (la base de datos), así como los distintos softwares; estos se detallan en el siguiente apartado.

De manera estricta se utilizaron un cuestionario como instrumento, ya que los datos fueron colocados directamente en una base de datos a través del uso de un dispositivo electrónico para su llenado, el llenado directo en la base de datos tuvo como fin evitar sesgos en el caso de pasar información de hojas de papel a un software o de software a software.

Como ya se mencionó, los instrumentos físicos fueron las I3D, los rollos de filamentos utilizados para la creación del material y el escáner 3D de escritorio para valorar las dimensiones de las prótesis 3D (en caso de contar con prótesis de mercado según se explica en la sección), estos se adquirieron a través de proveedores nacionales, siendo la empresa cotizada para este caso “Creativo 3D”, la razón de elegir dicho proveedor es por la oferta de precios que posee actualmente en el mercado nacional, así como también, con ellos se han cotizado I3D en el pasado. Para ver las especificaciones de los instrumentos físicos dirigirse



Informe final de Proyecto de Investigación

a la sección “Apéndice”. La técnica empleada fue el auto llenado de la base de datos previamente mencionada.

7.6. Resumen de las variables o unidades de análisis.

Tabla 1. Objetivos, variable, instrumentos y unidad de medida o cualificación utilizada en la investigación.

Objetivo específico	Variable	Instrumentos	Unidad de medida o cualificación
1. Establecer el modelado óptimo de la prótesis	Dimensiones	Software	Valor obtenido según: Centímetros
	Resistencia (empírica)	Software	Valor obtenido según: Kilogramo fuerza
	Deformación (empírica)	Software	Valor obtenido según: Milímetros
	Localización de la zona crítica	Software	Valor obtenido según: Kg fuerza/cm ²
	Modelado de la unión	Software	Valor obtenido según: Kilogramo fuerza/cm ²

Informe final de Proyecto de Investigación

2.Cuantificar la eficiencia de la I3D en la fabricación de la prótesis	Tiempo	Cronómetro de la I3D / Cuestionario	Valor indicado en Minutos
	Cantidad filamentos utilizados	Cuestionario	Valor indicado según el peso total del filamento empleado, indicado en miligramos
	Gasto total	Cuestionario	Valor del pago en quetzales
3.Determinar la resistencia última de la prótesis	Carga última de servicio	Máquina Universal	Valor indicado en: Kilogramo fuerza/cm ²
	Resistencia real	Máquina Universal	Dato indicado según: kilogramo fuerza/cm ²
	Localización de la ruptura	Máquina Universal	Dato indicado según: kilogramo fuerza/cm ²

7.7. Procesamiento y análisis de la información.

Los análisis estadísticos que se utilizaron fueron según tipo de variables usándose únicamente estadística descriptiva:

Según si el tipo de variable es categórica se utilizaron frecuencias absolutas y relativas (porcentajes), en el caso de ser la variable numérica se utilizaron promedios y desviación



Informe final de Proyecto de Investigación

estándar (según los datos distribuyan normal) o mediana y rango (según los datos no distribuyan normal).

En el caso del objetivo específico 1, 2 y la creación propiamente de la prótesis y uniones, los análisis computacionales empleados se basaron en códigos abiertos de red

La identificación de cada prótesis y unión posterior a su creación fue basada únicamente para el diseño intermedio y el final.

8. Aspectos éticos y legales

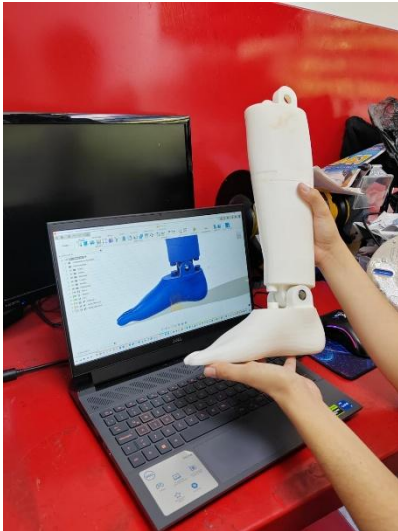
No aplica. Como fue mencionado previamente, no se aplicaron las prótesis en seres humanos

9. Resultados y discusión

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 1

Modelo digital y pieza impresa de prótesis de miembro inferior elaborada mediante impresión 3D

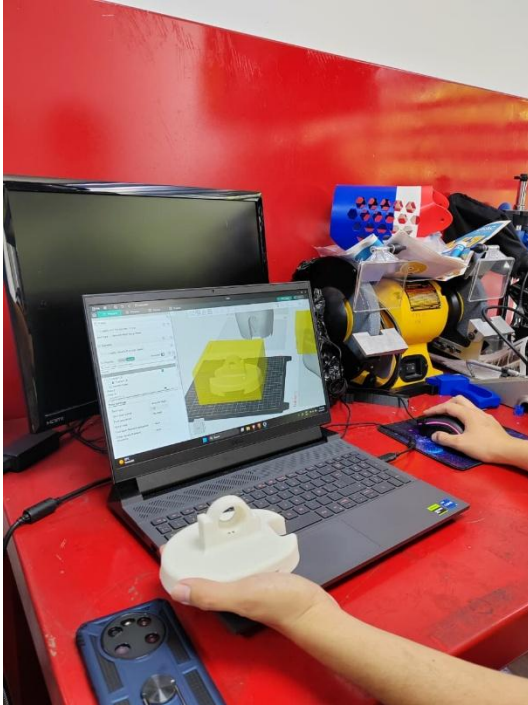


Nota. Fotografía tomada por el autor, 2025.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 2

Visualización del diseño computarizado y componente físico impreso de la unión protésica



Nota. Fotografía tomada por el autor, 2025.

En el caso del establecimiento del modelado óptimo: El modelado inicial de la prótesis se desarrolló en el software Fusion, una plataforma ampliamente utilizada para diseño paramétrico y simulación estructural en ingeniería biomédica. Este tipo de software permitió integrar geometrías complejas, aplicar cargas simuladas y realizar ajustes progresivos en la arquitectura interna del modelo.

El uso de una herramienta paramétrica como Fusion facilitó la iteración continua del diseño, así como la identificación temprana de posibles fallas, reduciendo tiempos y costos de producción.

Para la estructura interna de la prótesis se empleó un modelo basado en malla, que consistió en la división del diseño tridimensional en pequeños elementos geométricos que permitieron



Informe final de Proyecto de Investigación

calcular con mayor precisión la distribución de esfuerzos y deformaciones. Esta técnica coincide con el método de elementos finitos descrito en la literatura, el cual se usa ampliamente para analizar estructuras complejas y predecir puntos críticos de fractura en dispositivos ortopédicos (Pytel et al., 1994; McGuire et al., 1982). La representación mediante mallas permitió obtener información preliminar sobre zonas susceptibles a deformación, lo cual guió la posterior optimización estructural.

El proceso de refinamiento del modelo se llevó a cabo a través de ensayo y error, un procedimiento común en el desarrollo de prótesis impresas en 3D cuando no existe un estándar previo de diseño, especialmente en países donde esta tecnología aún se encuentra en fase de implementación. Este método permitió ajustar parámetros como espesor de pared, densidad del relleno y geometría de las uniones segmentadas, tomando como referencia la simulación de esfuerzos y la experiencia práctica durante la impresión. La literatura sostiene que la iteración progresiva del modelo es necesaria cuando se trabaja con materiales poliméricos, dado que pequeños cambios en la morfología interna pueden modificar significativamente la resistencia y rigidez del dispositivo (Valenzuela-Villela et al., 2020; MacLeod et al., 2020). De esta manera, el diseño final obtenido en Fusion integró los parámetros que lograron menor concentración de cargas y mayor estabilidad estructural.



Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 1

Resultados de eficiencia en la fabricación de dos prótesis impresas en 3D

Variable	Prótesis número 1	Prótesis número 2
	(blanca)	(azul)
Tamaño de la prótesis	100 centímetros	100 centímetros
Peso de la prótesis	1.8 kilogramos	2.2 kilogramos
Tiempo de creación	3300 minutos	4200 minutos
Cantidad de filamento utilizado	2 rollos	3 rollos
Gasto total	600 quetzales	700 quetzales

Nota. La tabla presenta las mediciones obtenidas durante la fabricación de ambas prótesis mediante impresión 3D, incluyendo dimensiones, peso, tiempo de creación, consumo de filamento y costos asociados.

El análisis de eficiencia en la fabricación de prótesis mediante impresión 3D mostró variaciones relevantes entre los dos modelos fabricados. Ambas prótesis presentaron un tamaño uniforme de 100 centímetros, lo que permitió homogeneizar la comparación. Sin embargo, se observaron diferencias en el peso final: la prótesis número 1 registró 1.8 kilogramos, mientras que la prótesis número 2 presentó un peso mayor de 2.2 kilogramos. Esta diferencia estuvo asociada principalmente a variaciones en la densidad interna del relleno y ajustes en el diseño del modelo tridimensional.

En cuanto al tiempo de creación, la prótesis número 1 requirió 3300 minutos (55 horas), mientras que la segunda alcanzó 4200 minutos (70 horas), lo cual representa un incremento del 27 por ciento en el tiempo total. Esta diferencia se relacionó con la complejidad

Informe final de Proyecto de Investigación

geométrica, el número de soportes generados y la densidad estructural configurada en el software de impresión.

Respecto al consumo de material, la prótesis número 1 utilizó 2 rollos de filamento PLA, mientras que la prótesis número 2 empleó 3 rollos. Esto se reflejó directamente en el costo final de fabricación: 600 quetzales para el primer dispositivo y 700 quetzales para el segundo. Estos datos evidencian que pequeñas modificaciones en el diseño pueden influir significativamente en los tiempos de producción, la cantidad de filamento requerido y los costos asociados.

Los resultados obtenidos muestran que la eficiencia en la fabricación de prótesis mediante impresión 3D depende significativamente de factores como la densidad de relleno, la geometría interna, el volumen de soportes y el tiempo de extrusión. Investigaciones previas han señalado que la impresión 3D, especialmente mediante tecnología FDM, presenta variabilidad considerable en tiempos y costos cuando se realizan modificaciones estructurales en el diseño, incluso si el tamaño externo se mantiene constante (Valenzuela-Villela et al., 2020). Esto concuerda con las diferencias observadas entre las dos prótesis fabricadas, donde la variación en el peso y en el consumo de material repercutió directamente en los tiempos de producción.

El incremento del 27 por ciento en el tiempo de creación entre ambos modelos coincide con lo reportado por estudios que indican que la complejidad geométrica y el grosor de las paredes aumentan significativamente la duración del proceso de impresión (Lal & Patralek, 2018). Este comportamiento se explica por la necesidad de generar más capas de extrusión y un mayor número de soportes estructurales, lo que prolonga el desplazamiento del extrusor y el proceso de deposición del filamento.

Asimismo, la diferencia en el consumo total de filamento coincide con investigaciones que documentan que las configuraciones internas del modelo —especialmente la densidad de infill— pueden modificar tanto el peso final como el costo del dispositivo (Manero et al., 2019). La prótesis número 2, al requerir 3 rollos de filamento, muestra cómo un cambio en

Informe final de Proyecto de Investigación

parámetros internos puede elevar los costos de producción sin modificar el tamaño externo del dispositivo.

En términos económicos, los resultados obtenidos apoyan lo señalado por Zuniga et al. (2017) y Alvial et al. (2017), quienes afirman que la impresión 3D reduce notablemente los costos de fabricación de dispositivos protésicos en comparación con métodos convencionales. Incluso con diferencias entre ambos modelos, el costo total se mantiene muy por debajo del precio de prótesis comerciales, lo cual evidencia el potencial de esta tecnología para mejorar el acceso en contextos de bajos recursos.

Cabe resaltar que para la prótesis número 1 se utilizó un relleno del 30%, teniendo 100% para las zonas críticas que se encontraron al utilizar la máquina universal; la prótesis número 2 tuvo un relleno del 100%; cabe resaltar las diferencias en el uso de materiales, el tiempo de fabricación y la fuerza máxima de compresión y deformación que se detallan en los siguientes resultados.

Tabla 2

Resultados de resistencia última de las prótesis sometidas a compresión

Característica	Prótesis azul	Prótesis blanca
Carga máxima soportada	4592 libras fuerza (lbf)	1673 libras fuerza (lbf)
Estado final	Alcanzó la ruptura	No alcanzó la ruptura
Comportamiento observado	Ruptura estructural al límite de carga	Deformación notable en el eje de la articulación de la rodilla

Nota. La tabla presenta los valores máximos de carga obtenidos durante las pruebas de compresión realizadas en laboratorio para ambas prótesis, así como el comportamiento estructural observado en cada dispositivo.

Informe final de Proyecto de Investigación

La evaluación de resistencia última se realizó mediante una prueba de compresión aplicada a las dos prótesis fabricadas, con el fin de determinar la carga máxima que cada una podía soportar antes de presentar deformaciones críticas o ruptura total. Los resultados mostraron diferencias sustanciales entre ambos modelos.

La prótesis azul alcanzó una capacidad máxima de 4592 libras fuerza, momento en el cual presentó ruptura estructural. Durante el incremento progresivo de la carga se observó un comportamiento estable, sin deformaciones visibles hasta aproximarse al límite de resistencia, momento en que la estructura cedió de manera abrupta.

Por otro lado, la prótesis blanca no llegó a la ruptura durante la prueba. Su resistencia máxima registrada fue de 1673 libras fuerza. Sin embargo, presentó una deformación considerable antes de alcanzar este valor, especialmente en la zona correspondiente al eje de la articulación de la rodilla. La deformación fue apreciable a simple vista y afectó la alineación del componente, aunque sin producir una fractura completa del material.

Los resultados demuestran que, bajo condiciones controladas de compresión, la prótesis azul mostró una resistencia significativamente mayor en comparación con la prótesis blanca, mientras que esta última exhibió un comportamiento más dúctil, con mayor deformación previa a alcanzar su límite de carga.

Los resultados obtenidos en las pruebas de compresión evidencian diferencias importantes en el comportamiento mecánico de las prótesis impresas en 3D, lo cual coincide con la literatura que señala que las propiedades estructurales de los dispositivos fabricados mediante tecnología aditiva dependen en gran medida de los parámetros de impresión, la densidad interna, el diseño geométrico y el tipo de filamento utilizado (Valenzuela-Villela et al., 2020). La prótesis azul mostró una resistencia última sustancialmente mayor (4592 lbf) en comparación con la prótesis blanca (1673 lbf), lo cual sugiere una configuración interna más robusta y una mejor distribución de cargas.

La fractura observada en la prótesis azul concuerda con lo descrito por MacLeod et al. (2020), quienes indican que los materiales impresos en 3D, especialmente aquellos basados en



Informe final de Proyecto de Investigación

polímeros, suelen presentar una resistencia elevada ante cargas iniciales, pero experimentan un colapso abrupto al alcanzar el límite estructural del material. Este tipo de comportamiento se relaciona con el patrón de capas propio de la impresión FDM, que genera planos de debilidad que pueden activarse cuando la fuerza supera la capacidad del material.

Por otra parte, la prótesis blanca mostró un comportamiento más dúctil, presentando deformación considerable antes de su límite de carga. Este patrón se ha descrito previamente en estudios que analizan configuraciones de menor densidad interna o con menor espesor en zonas críticas, lo que permite que el material se deforme antes de romperse (Lal & Patralek, 2018). El hecho de que la deformación se concentrara en el eje de la articulación de la rodilla concuerda con los hallazgos de McGuire et al. (1982), quienes destacan que los puntos de unión y los cambios bruscos en la geometría suelen concentrar esfuerzos que incrementan la probabilidad de deformación.

Asimismo, el desempeño diferenciado entre ambas prótesis refuerza lo señalado por Manero et al. (2019), quienes afirman que la impresión 3D permite obtener prótesis funcionales, pero la resistencia final depende estrechamente de la precisión del modelado y de la calidad del ensamblaje entre segmentos. Las diferencias estructurales entre los modelos evaluados, aun con dimensiones externas similares, evidencian la sensibilidad de los resultados frente a variaciones de diseño, lo cual subraya la importancia de una estandarización en los parámetros de impresión para dispositivos médicos.

Finalmente, la capacidad de la prótesis azul para soportar cargas superiores a 4500 lbf demuestra que, con un diseño adecuado y un modelado reforzado, las prótesis impresas en 3D pueden alcanzar niveles de resistencia comparables a los reportados para dispositivos ortopédicos de bajo costo utilizados en países en desarrollo (Zuniga et al., 2017). Sin embargo, la deformación temprana de la prótesis blanca indica la necesidad de optimizar el diseño de las articulaciones y uniones, que son los puntos más vulnerables en estructuras fabricadas mediante impresión aditiva.



Informe final de Proyecto de Investigación

10. Propiedad intelectual

No aplica.

11. Beneficiarios directos e indirectos

Tabla 2. Beneficiarios directos e indirectos de la investigación

Resultados, productos o hallazgos	Beneficiarios directos (institución, organización, sector académico o tipo de personas)	Número de beneficiarios directos	Beneficiarios indirectos (institución, organización, sector académico o tipo de personas)	Número de Beneficiarios indirectos
Prótesis de miembro inferior	Ninguno	0	República de Guatemala	> 2,000

12. Estrategia de divulgación y difusión de los resultados.

Tabla 3

	Sí	No
Presentación TV		X



Informe final de Proyecto de Investigación

	Sí	No
Entrevistas radiales		X
Podcast		X
Entrevista DIGI		X
Recursos audiovisuales		X
Congresos científicos nacionales o internacionales		X
Talleres		X
Publicación de libro		X
Publicación de artículo científico		x
Divulgación por redes sociales institucionales		X
Presentación pública		X
Presentación autoridades USAC		x
Presentación a beneficiarios directos		x
Entrega de resultados		X
Docencia en grado		X
Docencia postgrado		x
Póster científico		X



Informe final de Proyecto de Investigación

	Sí	No
Trifoliales		x
Conferencias		x
Otro (describa)		x

13. Contribución a las Prioridades Nacionales de Desarrollo (PND)

Los resultados de esta investigación contribuyen directamente a la Meta 3.8 de: Lograr la cobertura sanitaria universal, ya que la fabricación de prótesis mediante impresión 3D reduce los costos asociados a estos dispositivos, disminuyendo el riesgo financiero para los hogares y facilitando el acceso equitativo a tecnologías esenciales de rehabilitación. La evidencia demuestra que la impresión 3D permite producir prótesis funcionales a bajo costo, lo que favorece la asequibilidad y disponibilidad de dispositivos médicos para poblaciones con recursos limitados.

Asimismo, el proyecto fortalece la capacidad nacional para generar tecnologías de salud seguras y eficaces mediante modelado computacional y pruebas mecánicas, contribuyendo al componente 3.b.2 de esta meta, enfocado en investigación y desarrollo en salud. La producción local de prótesis mejora la oferta de servicios esenciales y reduce la dependencia de proveedores centralizados, lo que puede ampliar la cobertura de atención para personas amputadas en el país.

14. Otras contribuciones del proyecto al desarrollo

No aplica.



Informe final de Proyecto de Investigación

15. Vinculación

Las I3D y el escáner con la que se presenta la contrapartida de este proyecto fue donada por la Embajada de Korea del Sur en Guatemala (KOIKA), existiendo ya un vínculo de cooperación.

Adicionalmente, se han realizado visitas al IGSS, específicamente al Hospital de Rehabilitación, con el fin de observar y recibir retroalimentación sobre los materiales y diseños de prótesis utilizados actualmente. Estas visitas permitieron contrastar las características de las prótesis impresas en 3D con dispositivos convencionales, fortaleciendo la evaluación preliminar antes de la fase de aplicación clínica del proyecto.

El apoyo del Fabrication Laboratory (FabLab) de la Universidad de San Carlos de Guatemala fue fundamental, ya que proporcionó acompañamiento técnico en el modelado, manufactura, ajuste de parámetros de impresión y optimización de diseños. Su participación aseguró que los procesos de fabricación se realizaran con estándares adecuados y facilita la transferencia de conocimientos para el desarrollo y consolidación de la propuesta protésica.

16. Conclusiones

1. El modelado computacional permitió definir el diseño por mallas como óptimo en la fabricación de prótesis, identificando zonas críticas y mejorando la distribución interna de esfuerzos.
2. La impresión 3D demostró ser eficiente y de bajo costo en la fabricación de prótesis, con variaciones determinadas por los parámetros de diseño y el consumo de filamento.



Informe final de Proyecto de Investigación

3. Las pruebas de compresión evidenciaron que las prótesis impresas alcanzan resistencias considerables, confirmando su viabilidad estructural y la necesidad de reforzar áreas específicas.

17. Recomendaciones

1. A investigadores: se recomienda estandarizar el modelo computacional utilizado para el diseño de las prótesis, priorizando las configuraciones con menor concentración de esfuerzos. Esto facilitará la reproducibilidad del proceso y reducirá la variabilidad entre prototipos futuros.
2. Dirigido a Facultad de Ciencias Médicas: Se sugiere establecer un laboratorio de prototipado, con el fin de crear productos a bajo costo.
3. Dirigido a investigadores: con base en los resultados de resistencia última, se recomienda reforzar las zonas que mostraron tendencia a fracturarse, evaluando variaciones geométricas, densidades internas y posibles mejoras en la distribución de cargas. También es aconsejable explorar nuevos filamentos con mejores propiedades mecánicas.
4. Dirigido autoridades universitarias: se recomienda promover una fase 2 que incluya pruebas funcionales y biomecánicas más avanzadas, como ciclos de fatiga, simulación de marcha y validación clínica con supervisión de especialistas. Esto permitirá evaluar la idoneidad del producto para su futura implementación en pacientes amputados.
5. Dirigido a hospitales de tercer nivel e IGSS: Se aconseja fortalecer los vínculos de colaboración para recibir retroalimentación técnica de médicos rehabilitadores y traumatólogos sobre dimensiones, funcionalidad y características esperables de una prótesis de miembro inferior destinada a pacientes reales.



Informe final de Proyecto de Investigación

6. Dirigido a futuras líneas de investigación: Se recomienda continuar evaluando sistemas de vinculación entre distintas facultades.
7. Dirigido a investigadores interesados en continuidad temática: Se recomienda desarrollar estudios comparativos entre diferentes materiales de impresión (PLA, ABS, PETG, nylon, compuestos), evaluando su comportamiento en condiciones reales de uso, incluyendo humedad, temperatura, sudoración y desgaste por fricción, aspectos que no pudieron abordarse dentro de esta fase del proyecto.
8. Dirigido a futuros proyectos interinstitucionales: Se sugiere incorporar análisis económicos más amplios, incluyendo estudios de costo-beneficio y proyecciones de sostenibilidad financiera para la producción masiva de prótesis en Guatemala, lo cual excede el alcance técnico de la presente investigación.



Informe final de Proyecto de Investigación

Referencias

- Agies. (n.d.). AGIES NSE 2-10 demandas estructurales, condiciones de sitio y niveles de protección.
- Alvial, P., Bravo, G., Paz, M., Moreno, G., Alfaro, R., Cancino, R., & Zagal, J. (2017). Quantitative functional evaluation of a 3D-printed silicone-embedded prosthesis for partial hand amputation: A case report. *Journal of Hand Therapy*, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jht.2017.10.001>
- Boyaci, M. G., Fidan, U., Yuran, A. F., Yildizhan, S., Kaya, F., Kimsesiz, O., Ozdil, M., Cengiz, A., & Aslan, A. (2020). Augmented Reality Supported Cervical Transpedicular Fixation on 3D-Printed Vertebrae Model: An Experimental Education Study. *Turkish Neurosurgery*, 30(6), 937–943. <https://doi.org/10.5137/1019-5149.JTN.30733-20.2>
- César-Juárez, Á. A., Olivos-Meza, A., Landa-Solís, C., Cárdenas-Soria, V. H., Silva-Bermúdez, P. S., Suárez Ahedo, C., Olivos Díaz, B., & Ibarra-Ponce de León, J. C. (2018). Uso y aplicación de la tecnología de impresión y bioimpresión 3D en medicina. *Revista de La Facultad de Medicina (México)*, 61(6). http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0026-17422018000600043&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Creativo 3D. (n.d.). Sidewinder X1 (pp. 3–5).
- Cuellar, J. S., Smit, G., Breedveld, P., Zadpoor, A., & Plettenburg, D. (2019). Functional evaluation of a non-assembly 3D-printed hand prosthesis. *Journal of Engineering in Medicine*, 233(11), 1122–1131. <https://doi.org/10.1177/0954411919874523>
- Ebensperger, C., & Méndez, E. (2018). Caracterización del paciente con amputación traumática. In Universidad de San Carlos de Guatemala: Facultad de Ciencias Médicas. <https://core.ac.uk/download/pdf/158624057.pdf>



Informe final de Proyecto de Investigación

Hurtado, J. E. (2013). Análisis matricial de estructuras: curso con MATLAB.
<http://www.bdigital.unal.edu.co/9863/1/jorgeeduardohurtadogomez.2013.pdf>

Instituto Nacional de Estadística [INE]. (n.d.). Pobreza Menú, Instituto Nacional de Estadística. Retrieved April 25, 2021, from <https://www.ine.gob.gt/ine/pobreza-menu/>

[INE]. (2019a). Encuesta Nacional de Empleo e Ingresos.

[INE]. (2019b). Resultados Censo 2018.

[INE]. (2020). Encuesta de Evaluación de la Calidad de los Servicios Públicos Básicos - ENCASBA 2019-.

Lal, H., & Patralekh, M. K. (2018). 3D printing and its applications in orthopaedic trauma: A technological marvel. *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*, 9(3), 260–268.
<https://doi.org/10.1016/j.jcot.2018.07.022>

MacLeod, A., Patterson, M., MacTear, K., & Gill, H. S. (2020). 3D printed locking osteosynthesis screw threads have comparable strength to machined or hand-tapped screw threads. *Journal of Orthopaedic Research*, 38(7), 1559–1565.
<https://doi.org/10.1002/jor.24712>

Manero, A., Smith, P., Sparkman, J., Dombrowski, M., Courbin, D., Kester, A., Womack, I., & Chi, A. (2019). Implementation of 3D printing technology in the field of prosthetics: Past, present, and future. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16. <https://doi.org/10.3390/ijerph16091641>

McGuire, W., Gallagher, R., & Wiley, J. (1982). Matrix structural analysis. *Journal of Mechanical Design*, 104(529).

Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social. (2022). Morbilidad por amputaciones, atendidas en hospitales del MSPAS, años 2017 al 2021.

Ministerio de Trabajo y Previsión Social. (2022). Salario Mínimo.
<https://www.mintrabajo.gob.gt/index.php/leyes-y-convenios/30>



Informe final de Proyecto de Investigación

- Ortiz, K., Luna, H., Medina, J., & Soledispa, R. (2016). Los beneficios de las impresoras 3d como herramienta de innovación en la medicina. *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*.
<http://hdl.handle.net/20.500.11763/CARIBE-2016-06-3d>
- Plaza pública. (2019, March 5). Mano nueva, bonita y barata: cómo una impresora 3D puede regresar la esperanza. <https://www.plazapublica.com.gt/content/mano-nueva-bonita-y-barata-como-una-impresora-3d-puede-regresar-la-esperanza>
- Pytel, A., Singer, Ferdinand, L., Gaspar, T., Raimundo, Gutiérrez, T., & Ángel. (1994). Resistencia de materiales: introducción a la mecánica de sólidos (4th ed.).
<http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=AGRIUAN.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expression=mfn=016401>
- Range of Motion Proyect. (n.d.). 2020 Impact Report.
- Real Academia Española. (n.d.). Diccionario de la lengua española. Retrieved June 18, 2021, from <https://dle.rae.es>
- Valenzuela-Villela, K., García-Casillas, P., & Chapa-González, C. (2020). Progreso de la Impresión 3D de Dispositivos Médicos. *Revista Mexicana De Ingeniería Biomédica*, 41(1), 151–166. [dx.doi.org/10.17488/RMIB.41.1.12](https://doi.org/10.17488/RMIB.41.1.12)
- Wu, H. yang, Shao, Q. peng, Song, C. jing, Shang, R. ran, Liu, X. ming, & Cai, X. hua. (2020). Personalized Three-Dimensional Printed Anterior Titanium Plate to Treat Double-Column Acetabular Fractures: A Retrospective Case-Control Study. *Orthopaedic Surgery*, 12(4), 1212–1222. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/os.12741>
- Zuniga, J. M., Carson, A. M., Peck, J. M., Kalina, T., Srivastava, R. M., & Peck, K. (2017). The development of a low-cost three-dimensional printed shoulder, arm, and hand prostheses for children. *Prosthetics and Orthotics International*, 41(2), 205–209. <https://doi.org/10.1177/0309364616640947>



Informe final de Proyecto de Investigación

Apéndice

Agregue aquí mapas, fotografías, esquemas, códigos de computadoras, encuestas y documentos que se considere para respaldar las actividades y resultados de su investigación.

NOTA: La difusión y divulgación, por cualquier medio, de los resultados de la investigación tiene que incluir los créditos a la DIGI y unidad avaladora. En la publicación de un libro debe anotarse en la contraportada lo siguiente: “Este libro es producto del proyecto de investigación: Nombre del proyecto, avalado, aprobado y cofinanciado por el Fondo de Investigación de la Dirección General de Investigación, el nombre de la unidad avaladora de la Universidad de San Carlos de Guatemala, fecha, número de partida presupuestaria del proyecto de investigación”.

En las publicaciones en medios escritos y revistas científicas debe anotarse lo siguiente: “Esta investigación: Nombre del proyecto, fue cofinanciado por el Fondo de Investigación de la Dirección General de Investigación (DIGI) de la Universidad de San Carlos de Guatemala, año de ejecución, número de partida presupuestaria del proyecto de investigación”. Para los proyectos de investigación que gestionen el registro de un invento o patente, la DIGI emite las disposiciones que deben aplicarse de conformidad con las leyes y/o políticas de propiedad intelectual que correspondan.

Declaración del coordinador del proyecto de investigación

El coordinador de proyecto de investigación con base en el Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación cofinanciados por medio del Fondo de Investigación, artículo 20, elaboró este informe en función de los datos recabados en el proyecto.

José Antonio Alvarez Guillén	Firma
Fecha: 30/10/2025	



Informe final de Proyecto de Investigación

Aval del Director del Área de Investigación

De conformidad con el artículo 19 del Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación cofinanciados por medio del Fondo de Investigación otorgo el aval al presente informe final de las actividades realizadas en el proyecto Fabricación de prótesis de miembro inferior a través de impresoras 3D en mi calidad de Director del Área de Investigación, mismo que ha sido revisado y cumple su ejecución de acuerdo a lo planificado.

Dr. César Oswaldo García García, PhD	Firma y sello
Fecha: 30/10/2025	

Recepción de la Dirección General de Investigación

Vo.Bo. M.A. Sucelly Orozco de Morales	Firma
Fecha: 30/10/2025	

/Digi2025



Informe final de Proyecto de Investigación

Resultado de compresión



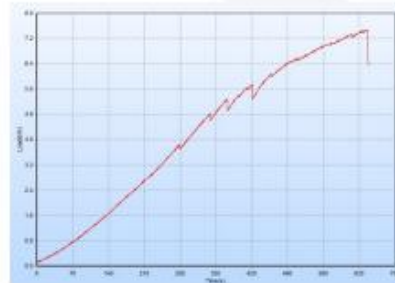
INFORME DE RESULTADOS

ENSAYO A COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES ESPECIALES

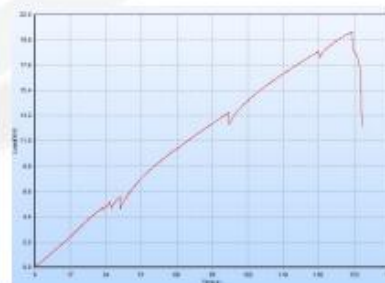
ORDEN DE TRABAJO:	OM 3732
CLIENTE / INTERESADO:	Dirección General de Investigación
CONTACTO:	Ing. Julio Álvarez
PROYECTO:	Fabricación de prótesis miembro inferior a través de impresora 3D
FECHA DE ENSAYO:	15 de julio 2025
FECHA DE INFORME:	24 de julio 2025

No.	Identificación	Diámetro (mm)	Carga Máxima		Resistencia (MPa)
			kN	Libras	
1	Prótesis Transtibial Articulada Color Blanco	---	7.47	1,673.3	---
2	Prótesis Transtibial Fija Color Azul	---	20.50	4,592.0	---

Curvas de Carga vs Deformación



Especimen No. 1



Especimen No. 2


Ing. Víctor A. Gálvez Ochoa
Gerente de Laboratorio
CONLAB, S.A.

CONLAB, S.A. – LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN – GEOTECNIA – ESTRUCTURAS
10 Av. 16-86 "C" zona 11, Ciudad de Guatemala – Tel. 2473-2332 -info@conlab.com.gt | - www.conlab.com.gt

Informe final de Proyecto de Investigación

Colocación en máquina universal.





Informe final de Proyecto de Investigación

Apéndice

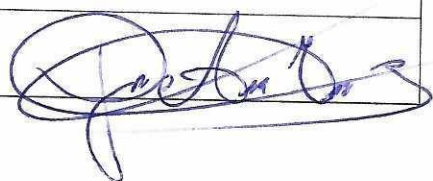
Agregue aquí mapas, fotografías, esquemas, códigos de computadoras, encuestas y documentos que se considere para respaldar las actividades y resultados de su investigación.

NOTA: La difusión y divulgación, por cualquier medio, de los resultados de la investigación tiene que incluir los créditos a la DIGI y unidad avaladora. En la publicación de un libro debe anotarse en la contraportada lo siguiente: “Este libro es producto del proyecto de investigación: Nombre del proyecto, avalado, aprobado y cofinanciado por el Fondo de Investigación de la Dirección General de Investigación, el nombre de la unidad avaladora de la Universidad de San Carlos de Guatemala, fecha, número de partida presupuestaria del proyecto de investigación”.

En las publicaciones en medios escritos y revistas científicas debe anotarse lo siguiente: “Esta investigación: Nombre del proyecto, fue cofinanciado por el Fondo de Investigación de la Dirección General de Investigación (DIGI) de la Universidad de San Carlos de Guatemala, año de ejecución, número de partida presupuestaria del proyecto de investigación”. Para los proyectos de investigación que gestionen el registro de un invento o patente, la DIGI emite las disposiciones que deben aplicarse de conformidad con las leyes y/o políticas de propiedad intelectual que correspondan.

Declaración del coordinador del proyecto de investigación

El coordinador de proyecto de investigación con base en el Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación cofinanciados por medio del Fondo de Investigación, artículo 20, elaboró este informe en función de los datos recabados en el proyecto.

José Antonio Alvarez Guillén	Firma
Fecha: 30/10/2025	



Informe final de Proyecto de Investigación

Aval del Director del Área de Investigación

De conformidad con el artículo 19 del Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación cofinanciados por medio del Fondo de Investigación otorgo el aval al presente informe final de las actividades realizadas en el proyecto Fabricación de prótesis de miembro inferior a través de impresoras 3D en mi calidad de Director del Área de Investigación, mismo que ha sido revisado y cumple su ejecución de acuerdo a lo planificado.

Dr. César Oswaldo García García, PhD	Firma y sello
Fecha: 30/10/2025	  Dr. César O. García García Director de Investigación

Recepción de la Dirección General de Investigación

Vo.Bo. M.A. Sucelly Orozco de Morales	Firma
Fecha: 30/10/2025	

/Digi2025