

Integration of Image Processing and 3D Printing for Enhanced Intracranial Malformation Detection and Surgical Planning

Celine Coello¹, Mariana Rodríguez,¹, Shelsy Gissel Zambrano Amador¹

Faculty Mentor: Fernanda Cáceres Lagos, M. Sc.¹

¹ Universidad Tecnológica Centroamericana UNITEC, Honduras, celinecoello@unitec.edu, mariale2309@unitec.edu, shelsy22@unitec.edu

Abstract—In the present study, the detection and analysis of a brain cyst were addressed through a 2D and 3D magnetic resonance image, highlighting the issues associated with intracranial malformation segmentation accuracy. The rationale was rooted in the need for detailed visualization to guide medical and surgical procedures. It was hypothesized that 3D printing of intracranial injuries models could enhance surgical planning and provide a more accurate spatial representation. The methodology focuses on the application of image processing techniques and 3D printing technology. It takes a practical and applied approach, leveraging specific tools such as 3D Slicer, MeshLab, and Ultimaker Curato achieve the stated objectives. The overall methodology aligns with an exploratory and applied approach to address the specific issue of intracranial injury detection and analysis. The most relevant results demonstrated the effectiveness of segmentation in highlighting brain information in magnetic resonance images. The application of 3D printing facilitated the creation of three-dimensional malformation models, providing a valuable tool in surgical planning, supporting the idea of improvements in pre-operative visualization, patient education, and three-dimensional understanding of anatomical structures. This approach not only positively impacts the accuracy of the process but also enhances medical-patient communication by providing clear and understandable representations of medical conditions.

Keywords—3D printing, image processing, image segmentation, intracranial injuries, medical imaging diagnosis, medical imaging, surgical planning

Integration of Image Processing and 3D Printing for Enhanced Intracranial Malformation Detection and Surgical Planning

Celine Coello¹, Mariana Rodríguez,¹, Shelsy Gissel Zambrano Amador¹

Faculty Mentor: Fernanda Cáceres Lagos, M. Sc.¹

¹ Universidad Tecnológica Centroamericana UNITEC, Honduras, celinecoello@unitec.edu, mariale2309@unitec.edu, shelsy22@unitec.edu

Abstract—In the present study, the detection and analysis of a brain cyst were addressed through a 2D and 3D magnetic resonance image, highlighting the issues associated with intracranial malformation segmentation accuracy. The rationale was rooted in the need for detailed visualization to guide medical and surgical procedures. It was hypothesized that 3D printing of intracranial injuries models could enhance surgical planning and provide a more accurate spatial representation. The methodology focuses on the application of image processing techniques and 3D printing technology. It takes a practical and applied approach, leveraging specific tools such as 3D Slicer, MeshLab, and Ultimaker Cura to achieve the stated objectives. The overall methodology aligns with an exploratory and applied approach to address the specific issue of intracranial injury detection and analysis. The most relevant results demonstrated the effectiveness of segmentation in highlighting brain information in magnetic resonance images. The application of 3D printing facilitated the creation of three-dimensional malformation models, providing valuable tool in surgical planning, supporting the idea of improvements in pre-operative visualization, patient education, and three-dimensional understanding of anatomical structures. This approach not only positively impacts the accuracy of the process but also enhances medical-patient communication by providing clear and understandable representations of medical conditions.

Keywords—3D printing, image processing, image segmentation, intracranial injuries, medical image diagnosis, medical imaging, surgical planning

I. INTRODUCCIÓN

La segmentación precisa de imágenes médicas, en particular de Resonancia Magnética (RM), es un aspecto fundamental en el apoyo a las decisiones clínicas. Este proceso, que implica la identificación y delimitación de regiones de interés en imágenes digitales, es esencial para la posterior modelación tridimensional de estructuras anatómicas. Este proyecto se enfoca en presentar un proceso detallado de segmentación de imágenes cerebrales obtenidas mediante RM. El objetivo principal es destacar la importancia de esta segmentación para identificar regiones de interés, particularmente en la detección y análisis de tumores y quistes cerebrales.

La Resonancia Magnética como técnica no invasiva, ofrece imágenes anatómicas detalladas, cruciales en el diagnóstico, tratamiento y monitoreo de enfermedades neurológicas. Sin embargo, la identificación precisa de áreas relevantes sigue siendo un desafío. Este informe aborda el uso de herramientas como 3D Slicer y MeshLab para el procesamiento y la seg-

mentación de imágenes, así como la aplicación de la impresión 3D en la representación tridimensional de estructuras cerebrales.

Además, se respalda este proceso con una investigación exhaustiva que resalta la importancia de la segmentación precisa en la detección y tratamiento de malformaciones cerebrales. Se explora la aplicación de algoritmos de procesamiento de imágenes en la identificación de lesiones intracraneales, ofreciendo un panorama integral de las posibilidades que brinda la tecnología 3D en la planificación quirúrgica y el análisis detallado de la anatomía cerebral. Este proyecto busca subrayar cómo estas herramientas y metodologías contribuyen a mejorar la precisión diagnóstica y el apoyo a las decisiones clínicas en el campo de la Neurocirugía y la Neurología.

La presente investigación se sitúa en el cruce de estas tecnologías y problemáticas, abordando la detección y análisis de lesiones intracraneales mediante imágenes de resonancia magnética en 2D y 3D. Para mejorar la precisión en la segmentación de estas malformaciones y proporcionar una representación espacial más detallada, se propone la utilización de la tecnología de impresión 3D. Esta metodología busca crear modelos tridimensionales físicos de las malformaciones cerebrales, permitiendo una planificación quirúrgica más precisa y una mejor comprensión de la anatomía intracraneal. Asimismo, se revisará el estado del arte, destacando estudios previos y soluciones actuales que respaldan la relevancia y la innovación de la propuesta de investigación.

A. Antecedentes del problema

En esta sección, se abordarán los antecedentes del proyecto, centrándose en la relevancia crucial de las imágenes de resonancia magnética en el ámbito médico. Se explorará la evolución de estas tecnologías y su aplicación en la visualización detallada de estructuras cerebrales, con especial énfasis en la detección y análisis de lesiones intracraneales. Este contexto servirá como base para comprender la integración posterior de la tecnología de impresión 3D en el diagnóstico y planificación quirúrgica de casos específicos de patologías cerebrales.

1) *Imagen por Resonancia Magnética:* El procesamiento de imágenes de Resonancia Magnética, Tomografía Computarizada (TC), Tomografía por Emisión de Positrones, Rayos X y otras modalidades, proveen un medio no invasivo y efectivo

para delinear la anatomía de un sujeto [1]. La resonancia magnética es una tecnología de imágenes no invasiva que produce imágenes anatómicas tridimensionales detalladas, sin el uso de la radiación dañina. Se usa frecuentemente para la detección de enfermedades, el diagnóstico y el monitoreo de tratamientos. Los escáneres de RM son particularmente apropiados para obtener imágenes de las partes no óseas o de los tejidos blandos del cuerpo [2].

La resonancia magnética difiere de la tomografía computarizada, en que no usan la radiación ionizante dañina de los rayos X. El cerebro, la médula espinal y los nervios, así como los músculos, ligamentos y tendones se ven mucho más claros con la RM que con los rayos X y la TC regulares. En el cerebro, la RM puede diferenciar entre la materia blanca y la materia gris, y también puede usarse para diagnosticar malformaciones como quistes y tumores. Debido a que la RM no utiliza rayos X u otra radiación, es la modalidad de imágenes preferida cuando se requieren imágenes frecuentes para el diagnóstico o la terapia, especialmente en el cerebro [2].

2) *Quistes intracerebrales*: Los quistes intracerebrales son hallazgos frecuentes en el diagnóstico por imagen del neurocráneo y no siempre son clínicamente significativos. Sin embargo, el espectro patológico de los quistes intracerebrales es muy amplio y, además de los hallazgos incidentales, incluye trastornos del desarrollo, tumores malformativos, neoplasias primarias y secundarias y etiologías infecciosas, como la formación de abscesos cerebrales, cisticercosis o residuos tras infecciones congénitas por citomegalovirus. Los defectos quísticos intracerebrales pueden estar causados por enfermedades inflamatorias del sistema nervioso central, como la esclerosis múltiple, así como por mitocondriopatías, leucodistrofia, alteraciones electrolíticas o síndrome de desmielinización osmótica o infartos cerebrales, por ejemplo, tras infartos lacunares o como cambios encefalomalácicos tras lesiones cerebrales traumáticas graves [3].

Además de los hallazgos radiológicos de los quistes en la RM o en la TC, la localización, la edad del paciente, su historia clínica y los diagnósticos de laboratorio son útiles para el diagnóstico diferencial. Además de la evaluación morfológica, las técnicas avanzadas de RM, como las imágenes ponderadas por difusión para epidermoides o el uso de espectroscopia de RM, pueden proporcionar información valiosa para el diagnóstico diferencial. Los quistes intracraneales pueden subdividirse en quistes intraventriculares y periventriculares, quistes intraaxiales y quistes en los espacios externos llenos de líquido. Los nódulos tumorales asociados y el comportamiento del medio de contraste de las paredes del quiste y/o de los componentes de los tejidos blandos asociados, así como la reacción del parénquima adyacente, son útiles para el diagnóstico y la evaluación [3].

3) *Dificultades de la cirugía*: Algunas malformaciones cerebrales son pequeñas y fáciles de separar del tejido cerebral que los rodea. Esto hace que sea posible extirparlas por completo. Otras lesiones no pueden separarse del tejido que los rodea. Algunas veces, éstas se encuentran cerca de una

parte importante del cerebro. La cirugía podría ser riesgosa en esta situación. Las pruebas por imágenes, como la tomografía computarizada y la resonancia magnética, se utilizan para planificar la trayectoria de la aguja. La biopsia del cerebro tiene un riesgo para complicaciones. Los riesgos incluyen sangrado en el cerebro y daño en el tejido del cerebro. La cirugía para extraer una malformación cerebral tiene el riesgo de que aparezcan efectos secundarios y complicaciones. Estos pueden incluir infecciones, sangrado, coágulos sanguíneos y lesiones en el tejido cerebral. Otros riesgos pueden depender de la parte del cerebro donde esté localizada la masa [4].

4) *Segmentación de imagen médica*: La segmentación se ha convertido en un componente clave para el delineamiento de estructuras anatómicas y otras regiones con el objetivo de asistir y automatizar ciertas tareas radiológicas, siendo este el primer paso para la modelación tridimensional de una estructura anatómica determinada basado en su estructura real [1].

Se define por segmentación de imágenes médicas al método gráfico que recibe como entrada una imagen digital en tonos de grises, que representa una determinada región anatómica, cuya salida está constituida por un conjunto de regiones poligonales catalogadas según un criterio determinado [1].

La segmentación de imágenes se ha convertido en un proceso clave para el delineamiento de ciertas estructuras anatómicas y otras regiones, con el objetivo de asistir y ayudar a los médicos en cirugías, biopsias y demás pruebas clínicas [5].

Para la segmentación de imágenes, se pueden utilizar muchos programas tanto de paga como de forma gratuita. Se conocen los siguientes dos programas:

- **3D Slicer**: Es un software de escritorio gratuito y de código abierto cuya función principal es permitir la visualización, segmentación y procesamiento de imágenes médicas en tres dimensiones. 3D Slicer permite cargar, visualizar y explorar conjuntos de datos médicos en 3D. Puede trabajar con datos de diversas modalidades, como resonancia magnética (RM), tomografía computarizada, imágenes de ultrasonido, entre otras. Es una herramienta versátil y potente que juega un papel crucial en la visualización y el análisis de datos médicos en 3D, contribuyendo significativamente a la investigación y la práctica clínica [6].

Es una herramienta poderosa que se utiliza en una variedad de aplicaciones médicas, incluidas:

- a) **Diagnóstico**: 3D Slicer se puede utilizar para ayudar a los médicos a diagnosticar enfermedades y lesiones. Por ejemplo, se pueden visualizar malformaciones, fracturas y otras anomalías.
- b) **Planificación quirúrgica**: Por ejemplo, se pueden crear modelos 3D del cuerpo del paciente para que los cirujanos puedan ver cómo se verán los órganos y tejidos durante la cirugía.
- c) **Educación**: 3D Slicer se puede utilizar para educar a los estudiantes de medicina y otros profesionales de la salud sobre imágenes médicas.

3D Slicer es una herramienta flexible y fácil de usar que puede ser utilizada por una variedad de usuarios, desde médicos experimentados hasta estudiantes principiantes [7], [8], [9].

- MeshLab: Es un software de código abierto diseñado para el procesamiento y la edición de mallas tridimensionales. Su funcionalidad principal se centra en la manipulación de modelos tridimensionales y mallas, permitiendo a los usuarios realizar diversas operaciones como limpieza, filtrado, remeshing, simplificación y visualización de datos tridimensionales. Es utilizado en diversas disciplinas, incluyendo la investigación científica, la ingeniería, la visualización de datos geoespaciales, la producción de contenidos para videojuegos y la industria de la fabricación aditiva [10].

Se trata de una herramienta versátil que se puede utilizar para una variedad de tareas, como:

- a) Procesamiento de escaneos 3D
- b) Modelado 3D
- c) Preparación de mallas para impresión 3D
- d) Ingeniería inversa de objetos
- e) Aplicaciones de realidad virtual

MeshLab es un programa completo que puede ser utilizada por una variedad de usuarios, desde principiantes hasta profesionales experimentados [11].

5) *Impresión 3D*: También llamada manufactura por adición es un conjunto de procesos que producen objetos a través de la adición de material en capas que corresponden a las sucesivas secciones transversales de un modelo 3D. Los plásticos y las aleaciones de metal son los materiales más usados para impresión 3D, pero se puede utilizar casi cualquier cosa, desde hormigón hasta tejido vivo [12].

Para la impresión 3D, el software de preparación de impresión 3D más utilizado en el mundo es UltiMaker Cura. Se trata de un software de código abierto desarrollado por Ultimaker, diseñado específicamente para la preparación y la impresión de modelos 3D en impresoras 3D FFF/FDM (Fused Filament Fabrication/Deposition Modeling). Este programa ofrece una interfaz intuitiva que permite a los usuarios cargar, posicionar, escalar y generar trayectorias de impresión para sus modelos tridimensionales. El software también proporciona opciones avanzadas para ajustar parámetros de impresión, permitiendo un mayor control sobre la calidad y la eficiencia del proceso de impresión 3D [13].

UltiMaker Cura ofrece una amplia gama de funciones para preparar modelos 3D para la impresión 3D, incluyendo:

- a) Importación: se pueden importar modelos 3D en una variedad de formatos, incluidos STL, OBJ, 3MF y X3D.
- b) Reparación: se pueden reparar modelos 3D con agujeros, superficies irregulares y otros problemas.
- c) Ajuste de parámetros de impresión: estos pueden ser desde la velocidad de impresión, la temperatura del extrusor hasta la altura de la capa.
- d) Visualización: es posible visualizar modelos 3D en 3D, lo que permite a los usuarios ver cómo se verá su modelo impreso.

e) Soporte para una amplia gama de impresoras 3D: Cura es compatible con una amplia gama de impresoras 3D, incluidas las impresoras 3D de escritorio, las impresoras 3D industriales y las impresoras 3D de resina [14].

B. Estado del arte

1) *Caso evidencia de la problemática*: El artículo descrito por [15] aborda la problemática de la detección y análisis de tumores cerebrales mediante imágenes de resonancia magnética (MRI) en 2D y 3D. Destaca las dificultades asociadas con la precisión de la segmentación de tumores, particularmente la distinción entre las partes sólidas y quísticas de estos. Además, se resalta la importancia de una visualización más detallada para guiar procedimientos quirúrgicos y de tratamiento.

La resonancia magnética es una herramienta sensible pero susceptible a artefactos por movimientos mínimos del paciente durante el escaneo. La segmentación precisa es crucial para distinguir entre tejidos tumorales y sanos. La detección 2D se basa en técnicas de filtrado y detección de bordes, mientras que la representación 3D se logra mediante técnicas de mapeo y modelado de volúmenes.

La resolución de este problema con impresión 3D de tumores tiene el potencial de mejorar la precisión y la comprensión espacial de las lesiones intracraneales, permitiendo a los médicos una visualización más detallada para planificar tratamientos quirúrgicos precisos. Esta solución busca aprovechar las capacidades de la impresión 3D para crear modelos tridimensionales de las malformaciones a partir de imágenes médicas, lo que facilitaría la planificación quirúrgica y el estudio detallado de la anatomía de la masa en un entorno físico.

El artículo menciona la necesidad de una solución más avanzada y detallada para la detección y análisis de tumores cerebrales, lo que respalda la intención del proyecto de emplear la impresión 3D para generar modelos tridimensionales. Además, resalta los beneficios potenciales de esta solución en términos de mejor visualización y planificación de procedimientos médicos, lo que respalda la justificación para buscar métodos más avanzados, como la impresión 3D, en el campo de la medicina para mejorar la precisión y eficacia de los tratamientos relacionados con lesiones intracraneales.

2) *Soluciones actuales*: El avance en el aprendizaje profundo 3D ha llevado a mejoras significativas en la precisión y la reducción del tiempo de procesamiento. Estas mejoras tienen aplicaciones en diversos dominios, como imágenes médicas, robótica y navegación de vehículos autónomos, permitiendo la identificación y segmentación de diversas estructuras [16]. También, se ha explorado la aplicación del aumento de atributos en el preprocesamiento de imágenes médicas como una estrategia para mejorar el rendimiento de los esquemas de segmentación automática basados en aprendizaje profundo [17].

Neurocirujanos del Hospital Universitario Virgen del Rocío han empezado a utilizar modelos 3D de las lesiones que han de extirpar en el quirófano para planificar complejas cirugías

de un modo más preciso y poder eliminar todo el tejido maligno o dañado sin afectar a las zonas sanas. Los pacientes se benefician de este modo de intervenciones más seguras en las que se minimizan los riesgos de secuelas sobre la movilidad o sensibilidad [18].

Los neurocirujanos recrean un modelo 3D del paciente con su anatomía propia, la lesión y las zonas del cerebro que se quieren preservar. Esto les ayuda a entender mejor su disposición en las tres dimensiones y a elegir la forma de abordar la lesión, aumentando así la seguridad del paciente. Los profesionales de la salud pueden practicar y perfeccionar técnicas en modelos físicos antes de realizar intervenciones reales en pacientes [18].

Por otro lado, existen diferentes métodos para segmentar una imagen médica por ejemplo mediante K-means, Otsu y Chan-Vese; estos se han utilizado para segmentar imágenes de pulmones y un tumor cerebral [19]. En donde se concluyó que para la segmentación de los pulmones los algoritmos se comportan de manera similar, pero en el caso del tumor, el método de Chan-Vese es preferible [19].

La segmentación de lesiones cerebrales ha representado un desafío en el ámbito del procesamiento de imágenes. Se han llevado a cabo estudios con el fin de aprovechar las capacidades de la impresión 3D para generar modelos tridimensionales de las malformaciones a partir de imágenes médicas. Esta aproximación facilitaría la planificación quirúrgica y permitiría un estudio detallado de la anatomía de estas lesiones en un entorno físico [20].

En el 2022 se llevó a cabo una cirugía de una malformación craneana a un bebé de 12 meses que tenía la cabeza alargada. Se realizaron diversos estudios, incluyendo una tomografía de donde resultó la imagen para su debido procesamiento e impresión en 3D a escala; a lo que el neurocirujano comentó que esto le permitió hacer una planificación quirúrgica antes de ingresar al quirófano, en donde se diseñaron las técnicas que se emplearon en la cirugía [21].

En la actualidad, se ha notado que la impresión 3D se emplea en diversos contextos, como formación, planificación preoperatoria, creación de férulas, fabricación de productos funcionales no invasivos y desarrollo de dispositivos de ayuda para la prevención de la COVID-19. La utilización de la impresión 3D en medicina contribuye a la individualización y mejora la calidad de la atención médica [22].

La tecnología de modelado 3D tiene un potencial significativo para su aplicación en diversos aspectos de la cirugía de cáncer de recto; no obstante, actualmente se encuentra en una fase experimental en este entorno. Se ha evidenciado que tanto los modelos físicos como los virtuales en 3D son valiosos en la educación quirúrgica, siendo los modelos impresos en 3D preferidos en algunas instancias [23].

C. Objetivo general

El objetivo de esta investigación es desarrollar un método de segmentación para identificar un quiste cerebral de una imagen de Resonancia Magnética, con el fin de respaldar

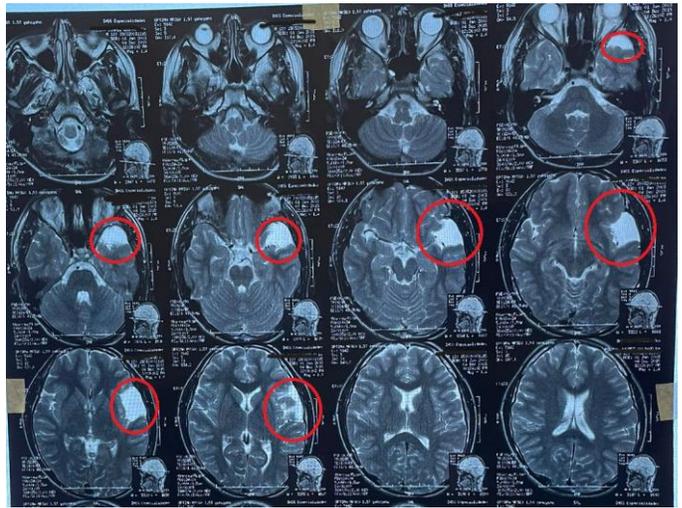


Fig. 1. Quiste aracnoideo del sujeto (circulado en rojo)

decisiones clínicas o servir de herramienta para planificaciones quirúrgicas.

Lo que sigue de este documento se divide en capítulos. Primero, se expone la metodología enfocada en la detección de lesiones cerebrales mediante imágenes de resonancia magnética. Seguidamente, se destacan los resultados de la metodología descrita al igual que su validación. Luego se discuten las oportunidades de la aplicación del proyecto al igual que sus recomendaciones para mejoras futuras. Por último, se presentan las conclusiones y agradecimientos de este estudio.

II. METODOLOGÍA

La metodología adoptada en este proyecto se caracteriza por un enfoque práctico y aplicado para la detección y análisis de lesiones intracraneales a partir de imágenes de resonancia magnética, con el objetivo central de mejorar la planificación quirúrgica.

Para alcanzar el objetivo establecido, se diseñó un estudio de tipo exploratorio y aplicado, centrándose en el caso específico de un sujeto masculino de 22 años con un quiste aracnoideo en el valle silviano del hemisferio derecho del cerebro como se señala en la Figura 1. La imagen del estudio se realizó en una resonancia magnética lo cual contribuyó positivamente al momento de procesamiento y segmentación de la misma.

La metodología se apoyó en herramientas específicas, incluyendo técnicas de procesamiento de imágenes y software especializado, 3D Slicer, MeshLab y Ultimaker Cura, orientadas a lograr una segmentación precisa y la creación de modelos tridimensionales. Se debe recalcar que todos estos programas son de fácil acceso puesto que se trata de aplicaciones gratuitas y de código abierto.

Como simplificado en el diagrama de la Figura 2, el procedimiento se dividió en cuatro fases importantes: segmentación, suavizado, preparación de la impresión en 3D e impresión final.

Fases del proyecto



Fig. 2. Fases en las que se llevó a cabo el proyecto

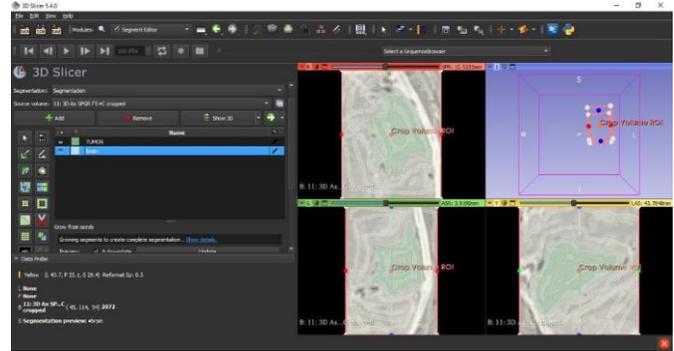


Fig. 4. Segmentación del quiste por cortes en 3D Slicer

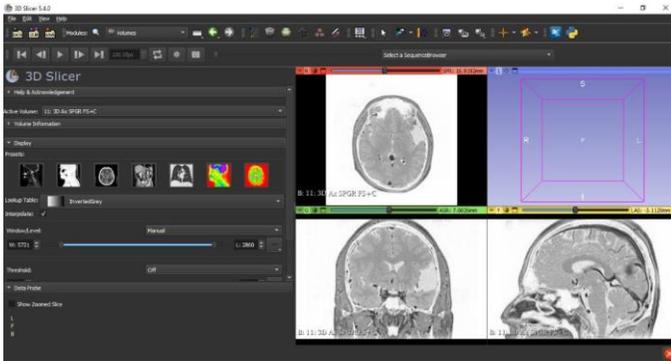


Fig. 3. Visualización de los cortes de la imagen en 3D Slicer

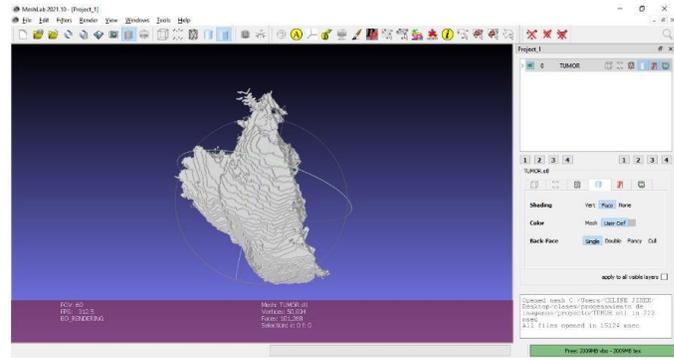


Fig. 5. Visualización en MeshLab del quiste previamente segmentado

A. Segmentación de la imagen

Para la carga, segmentación y exportación de imágenes en 3D Slicer se desarrolló con un enfoque sistemático. En una fase inicial, se debió verificar que las imágenes se encontraran en formato DICOM, ya que así se asegura de la compatibilidad necesaria con el software. A través de la interfaz del programa, se realizaron la carga y selección precisa de cortes relevantes provenientes del examen médico proveído. Al cargar los diferentes cortes, se obtuvo una visualización completa del cerebro representada en los planos horizontal, frontal y sagital como se observa en la Figura 3.

La etapa crítica de segmentación del quiste se llevó a cabo mediante la aplicación de módulos especializados. El módulo "Volumes" permitió una personalización visual efectiva, mientras que el módulo "Crop Volume" posibilitó el recorte preciso de la región de interés. Sin embargo, el núcleo del procedimiento radicó en el módulo "Segment Editor", donde se definieron y delinearón los tejidos a segmentar. La herramienta "Paint" se utilizó para marcar las áreas de interés, y la función "Grow from seeds" propagó la segmentación de manera coherente como se aprecia en la Figura 4. La validación minuciosa de la segmentación se llevó a cabo mediante revisiones detalladas en cada corte, permitiendo correcciones según fuera necesario.

Como pasos finales de esta fase, se avanzó hacia la visualización en 3D del quiste como confirmación de una segmentación satisfactoria. Al seleccionar "Segment Preview" en el módulo "Segmentations", se generó una representación

tridimensional mediante superficies cerradas. Para proseguir con la fase de suavizado, se exportó el modelo segmentado en formato STL, asegurando la preservación de los datos esenciales durante el proceso de almacenamiento de la escena.

B. Suavizado del modelo segmentado

La fase de suavizado y exportación de la pieza segmentada se llevó a cabo con la plataforma especializada MeshLab. Tras la carga del archivo STL proveniente de 3D Slicer, se procedió a la selección y visualización de la pieza en cuestión evidenciado en la Figura 5.

La etapa crucial del suavizado se llevó a cabo mediante el filtro "Laplacian Smooth". Este filtro es una herramienta poderosa utilizada en el procesamiento de mallas que actúa redistribuyendo las posiciones de los vértices de la malla para lograr una superficie más uniforme y estéticamente agradable. Gracias a esta técnica, se consiguió eliminar irregularidades y asperezas en la superficie del modelo, lo que resultó en una representación mucho más suave y continua, como se puede observar en el modelo final representado en la Figura 6.

A pesar de la mejora, se identificaron elementos pequeños flotantes alrededor de la pieza. Estos elementos eran probablemente el resultado de una selección inadvertida durante la fase de segmentación inicial, comprometiendo la calidad y la precisión del modelo. MeshLab ofreció la solución mediante el filtro "Delete Selected Faces", eliminando selectivamente estos elementos no deseados.

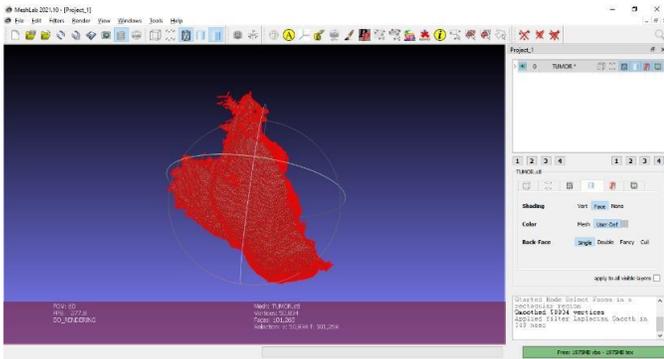


Fig. 6. Suavizado Laplaciano del modelo

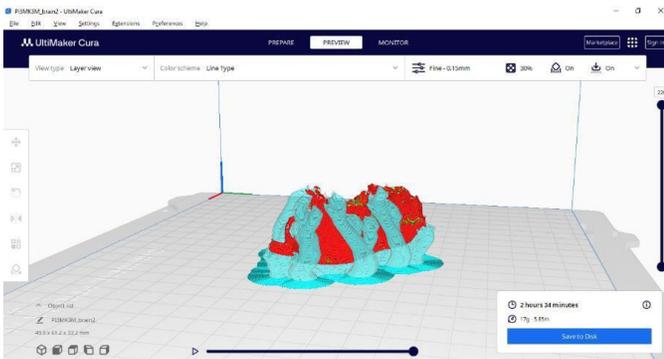


Fig. 7. Preparación del modelo del quiste para impresión



Fig. 8. Resultado de la impresión 3D con el soporte

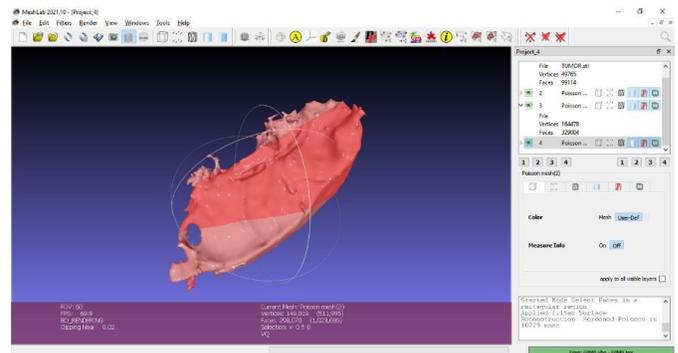


Fig. 9. Segmentación y suavizado final del quiste

C. Preparación del modelo para la impresión 3D

Tras asegurar la completa suavización de la pieza en MeshLab, el siguiente paso crucial consistió en exportar el modelo para su impresión 3D en la plataforma elegida, Ultimaker Cura. Asimismo, como este software exige que se especifique la impresora que se usará para delimitar las dimensiones de la mesa de trabajo, se definió que se emplearía la impresora Prusa i3 Mk3/Mk3s. Esta acción se complementó definiendo el material de impresión, optando por PLA puesto que es el material más común para imprimir.

La fase de preparación se centró en reducir el tiempo de impresión y mitigar riesgos de malformaciones. Para esto, se destacó la importancia de seleccionar y posicionar la pieza de manera horizontal en la mesa de trabajo, evitando deformaciones y ahorrando tiempo de impresión. Igualmente, se procedió a la configuración de los parámetros de impresión incluyendo la resolución de la boquilla, la densidad de llenado, el soporte y la adhesión. Este proceso dio el resultado que se ve en la Figura 7.

Para continuar a la fase de impresión, se aseguró de exportar el archivo en formato G-Code para compatibilidad con la impresora 3D.

D. Impresión del modelo y pulido final

En esta fase se detalló la culminación del proceso de impresión 3D. Primero se aseguró de que la mesa de trabajo se encontrara limpia puesto que es importante para la calidad

de impresión contar con una superficie uniforme. Asimismo, se aplicó pegamento en barra a la mesa para mejorar la adherencia y garantizar la estabilidad del modelo.

La pieza se cargó a la impresora mediante una memoria SD y se seleccionó el archivo correcto en el display. Con esto listo, la impresora inició automáticamente con la impresión del modelo final. La impresión tomó dos horas y media en completarse y resultó como en la Figura 8.

No obstante, éste no es el resultado final de la fase puesto que se requería realizar la propia eliminación del soporte para revelar la forma original de la pieza. Esto se logró mediante el uso de una cuchilla en las partes más rígidas y detalladas y con las manos en las que eran lo suficientemente frágil.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El proceso de segmentación del quiste cerebral utilizando la combinación de software como 3D Slicer y MeshLab demostró resultados prometedores. Se logró conseguir una segmentación uniforme y suavizada del quiste con la oportunidad de su visualización tridimensional, como se ilustra en la Figura 9.

Asimismo, el segundo resultado consistió en la impresión exitosa de la pieza, incluyendo la absoluta remoción del soporte sobrante. De esta manera, se logró obtener una reproducción fiel de la anatomía del quiste cerebral (Figura 10).

La pieza impresa se sometió a evaluación y certificación por parte de la neurocirujana responsable del caso. La pro-



Fig. 10. Pieza final

fesional confirmó la utilidad y precisión de esta metodología en el contexto diagnóstico. La representación física del quiste brindó una perspectiva táctil que complementó la información proporcionada por las imágenes médicas convencionales. Esta certificación refuerza la viabilidad de utilizar la impresión 3D como herramienta de apoyo en el diagnóstico de patologías cerebrales.

La implementación de la impresión 3D en el ámbito médico, específicamente en la reproducción de estructuras cerebrales, presenta notables avances y oportunidades. La combinación de técnicas de segmentación y suavizado con la tecnología de impresión 3D permite una representación tridimensional detallada y precisa. La certificación de profesionales de la salud respalda la aplicación práctica de este enfoque.

Sin embargo, se pudieron notar varias limitaciones en las técnicas utilizadas en esta investigación, tales como:

- Las variaciones en la calidad de las imágenes pueden afectar la precisión de la segmentación, lo que podría llevar a identificaciones incorrectas o incompletas de las regiones de interés.
- Herramientas como 3D Slicer y MeshLab, al ser de código abierto, tienen limitaciones inherentes en términos de capacidad de procesamiento, algoritmos de segmentación y precisión. La eficiencia y exactitud de estos programas pueden verse comprometidas por la complejidad de las estructuras anatómicas y la variabilidad de las imágenes médicas.
- Los algoritmos utilizados para la segmentación y análisis de imágenes tienen sus propias limitaciones en cuanto a su capacidad para diferenciar entre tejidos normales y patológicos, especialmente en casos donde las diferencias de contraste no son evidentes.
- La tecnología de impresión 3D puede introducir errores en la representación física de las estructuras cerebrales debido a limitaciones en la resolución de las impresoras y en los materiales utilizados para la impresión.

A pesar de alcanzar un producto terminado, siempre se acepta la posibilidad de mejoras y expansiones futuras de

este proyecto. Por esto mismo, se proponen las siguientes recomendaciones:

- Desarrollar un modelo tridimensional del cerebro que excluya la presencia del tumor, lo que permitiría una planificación quirúrgica más precisa. Este modelo facilitaría a los cirujanos la visualización detallada de las estructuras anatómicas normales y la evaluación de las posibles rutas quirúrgicas, mejorando así las estrategias de intervención.
- Explorar la posibilidad de optimizar los procesos de segmentación y suavizado para aumentar la eficiencia y reducir el tiempo de procesamiento.
- Establecer un protocolo detallado para el uso y la verificación del modelo 3D. La implementación de este protocolo garantizaría que los modelos 3D sean fiables y reproducibles, proporcionando una herramienta robusta para la planificación quirúrgica y la toma de decisiones clínicas.
- Considerar la aplicación de este método en una variedad de casos clínicos, fuera del contexto de lesiones intracraneales, para evaluar su versatilidad y validez en diferentes escenarios.
- Fomentar la colaboración con profesionales de diversas disciplinas médicas para enriquecer el enfoque y adaptarlo a diversas necesidades clínicas.
- Mantenerse al tanto de los avances tecnológicos y metodológicos en impresión 3D y procesamiento de imágenes médicas para implementar mejoras continuas.

IV. CONCLUSIONES

Se logró presentar la segmentación de una imagen de Resonancia Magnética, resaltando la región de interés en este caso un tumor cerebral, proporcionando un valioso apoyo a las decisiones clínicas de los neurocirujanos. La transparencia en la segmentación es esencial para la confianza en los resultados, especialmente en el ámbito médico.

Esta metodología, respaldada por la aplicación de la impresión 3D, no solo mejora la comprensión de la técnica utilizada, sino que también destaca su importancia en la planificación y tratamiento en neurocirugía. Se ha demostrado de manera concluyente que la impresión 3D no solo optimiza la toma de decisiones clínicas al ofrecer información visualmente destacada, sino que también revitaliza la comunicación médico-paciente al proporcionar representaciones claras y comprensibles de las condiciones médicas. En última instancia, la conjunción de la segmentación avanzada y la impresión 3D redefine los estándares en la práctica neuroquirúrgica, elevando la calidad de la atención y abriendo nuevas posibilidades en el ámbito médico.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecer a la Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC) por proporcionar los recursos necesarios para llevar a cabo este proyecto. Además, nos gustaría expresar nuestro agradecimiento a cada docente que tuvo la oportunidad de orientar y apoyar este proyecto durante todo el proceso de

investigación. Se les reconoce el constante estímulo y motivación que nos ha impulsado a perseguir nuestras metas académicas. Por último, se agradece enormemente al sujeto de estudio por tener la suficiente confianza en nosotras para trabajar con su caso y entregar este proyecto terminado.

REFERENCIAS

- [1] D. Ortega y A. Iznaga Benítez, Técnicas de Segmentación de Imágenes Médicas. 2008. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Dolgis-Ortega/publication/275951781_Tecnicas_de_Segmentacion_de_Imagenes_Medicas/links/554a60730cf21ed21358e423/Tecnicas-de-Segmentacion-de-Imagenes-Medicas.pdf
- [2] NIBIB, «Imagen por Resonancia Magnética (IRM)», National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering. Accedido: 16 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.nibib.nih.gov/espanol/temas-cientificos/imagen-por-resonancia-magn%C3%A9tica-irm>
- [3] Ahlhelm F, Shariat K, Götschi S, Ulmer S. Intrakranielle zystische Läsionen [Intracranial cystic lesions]. Radiologe. 2018 Feb;58(2):120-131. German. doi: 10.1007/s00117-017-0322-z. PMID: 29143062
- [4] D. N. Louis et al., «The 2021 WHO Classification of Tumors of the Central Nervous System: a summary», Neuro-Oncology, vol. 23, n.o 8, pp. 1231-1251, ago. 2021, doi: 10.1093/neuonc/noab106.
- [5] R. Cabello, «Segmentación de órganos en imágenes médicas con Inteligencia Artificial», Plain Concepts. Accedido: 9 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.plainconcepts.com/es/segmentacion-organos-inteligencia-artificial/>
- [6] 3D Slicer, «3D Slicer image computing platform», 3D Slicer. Accedido: 9 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://slicer.org/>
- [7] 3D Slicer website. (n.d.). Retrieved December 10, 2023, from <https://www.slicer.org/>
- [8] Cline, H. E., Ng, L., Hart, T. L., Pieper, S., Schroeder, W. J., Kikinis, R., ... & Rubin, D. L. (2013). 3D Slicer: A platform for image-guided therapy. IEEE transactions on visualization and computer graphics, 19(6), 1151-1159.
- [9] Kikinis, R., Pieper, S., Cline, H. E., Ng, L., Schroeder, W. J., & Rubin, D. L. (2003). 3D Slicer: A software platform for medical image analysis and visualization. Journal of medical imaging, 20(1), 22-29.
- [10] M. G., «Todo lo que necesitas saber sobre MeshLab», 3Dnatives. Accedido: 9 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/meshlab-caracteristicas-07072022/>
- [11] Cignoni, P., Corsini, M., Dellepiane, M., Fagnano, M., Ganovelli, F., & Montani, S. (2008). MeshLab: An open-source system for processing and editing 3D triangular meshes. ACM Transactions on Graphics (TOG), 27(5), 1.
- [12] © 2023 Autodesk Inc., «¿Qué es la impresión 3D? | Programa para impresora 3D | Autodesk». Accedido: 9 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.autodesk.mx/solutions/3d-printing>
- [13] © 2011-2023 UltiMaker, «UltiMaker Cura», UltiMaker. Accedido: 9 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura/>
- [14] Ultimaker Cura. (n.d.). Retrieved December 10, 2023, from: <https://ultimaker.com/software/cura/>
- [15] A. A. Siddiqi, G. B. Narejo, S. Zardari, M. Tariq, y S. Andleeb, «Application of image processing algorithms for brain tumor analysis in 2D and 3D leading to tumor's positioning in skull: Overview», vol. 36, n.o 1, p. 8, ene. 2017, doi: 10.3316/informit.937106467248588.
- [16] J. Wang, R. Chang, Z. Zhao, y R. S. Pahwa, «Robust Detection, Segmentation, and Metrology of High Bandwidth Memory 3D Scans Using an Improved Semi-Supervised Deep Learning Approach», Sensors, vol. 23, n.o 12, Art. n.o 12, ene. 2023, doi: 10.3390/s23125470.
- [17] K. Apivanichkul, P. Phasukkit, P. Dankulchai, W. Sittiwong, y T. Jitwatcharakomol, «Enhanced Deep-Learning-Based Automatic Left-Femur Segmentation Scheme with Attribute Augmentation», Sensors, vol. 23, n.o 12, Art. n.o 12, ene. 2023, doi: 10.3390/s23125720.
- [18] Junta de Andalucía, «Uso de modelos 3D para lograr cirugías más precisas», Junta de Andalucía. Accedido: 9 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.juntadeandalucia.es/presidencia/portavoz/social/146993/VirgendelRocio/Neurocirugia/Tecnologia/3D/Cancer/Tumores/Quirofano>
- [19] NOTIMEX, «Analizan nuevas técnicas para mejorar resultados de imágenes médicas», NOTIMEX, Notimex, Ciudad de México, 2016. Accedido: 24 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.proquest.com/docview/1753919838/citation/C16E990996D44B84PQ/4>
- [20] A. A. Siddiqi, G. B. Narejo, S. Zardari, M. Tariq, y S. Andleeb, «Application of image processing algorithms for brain tumor analysis in 2D and 3D leading to tumor's positioning in skull: Overview», vol. 36, n.o 1, p. 8, ene. 2017, doi: 10.3316/informit.937106467248588.
- [21] Diario Correo, «Usan impresión 3D para operar el cráneo de una bebé de 12 meses», Correo, ContentEngine LLC, a Florida limited liability company, Lima, Perú, 30 de enero de 2022. Accedido: 24 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.proquest.com/docview/2708846112/citation/DADE9AF8FA3B493FPQ/2>
- [22] S. Peleshok y K. Golovko, «3D printing and medicine», Russian Military Medical Academy Reports, vol. 41, pp. 325-333, oct. 2022, doi: 10.17816/rmmar88645.
- [23] A. Przedlacka, G. Pellino, J. Fletcher, F. Bello, P. P. Tekkis, y C. Kontovounisios, «Current and future role of three-dimensional modelling technology in rectal cancer surgery: A systematic review», World J Gastrointest Surg, vol. 13, n.o 12, pp. 1754-1769, dic. 2021, doi: 10.4240/wjgs.v13.i12.1754.