



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Desarrollo de la interfaz de un navegador
de enseñanza neuroquirúrgico en
procedimientos de ventriculostomía**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera en Sistemas Biomédicos

P R E S E N T A

Daniela Montserrat Flores Macedonio

DIRECTOR DE TESIS

Dr. César Fabián Domínguez Velasco



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado DESARROLLO DE LA INTERFAZ DE UN NAVEGADOR DE ENSEÑANZA NEUROQUIRURGICO EN PROCEDIMIENTOS DE VENTRICULOSTOMIA que presenté para obtener el título de INGENIERO EN SISTEMAS BIOMÉDICOS es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

DANIELA MONTSERRAT FLORES MACEDONIO
Número de cuenta: 317111585

Contenido

Agradecimientos.....	5
1. Resumen.....	6
2. Introducción.....	7
3. Planteamiento del problema.....	9
3.1. Justificación.....	9
3.2. Objetivos.....	10
3.2.1. Objetivos específicos.....	10
4. Marco Teórico.....	11
4.1. Ventriculostomía.....	11
4.1.1. Drenaje ventricular externo (DVE).....	12
4.1.2. Ventriculostomía endoscópica del tercer ventrículo (ETV).....	13
4.1.3. Drenaje Ventricular peritoneal shunt (DVP).....	14
4.1.4. Complicaciones por la colocación del drenaje ventricular.....	14
4.2. Realidad Aumentada.....	15
4.3. Interfaz de Usuario.....	15
4.3.1. Interfaz gráfica de usuario (GUI).....	17
4.3.2. Interacción humano-computadora (HCI).....	18
4.4. Sistemas de navegación neuroquirúrgico.....	18
4.5. Antecedentes y Estado del Arte.....	19
5. Metodología.....	24
5.1. Obtención de anatomías 3D.....	24
5.2. Impresión 3D de los modelos.....	26
5.3. Navegador quirúrgico de ventriculostomía.....	27
5.4. Diseño de la Interfaz de usuario.....	29

5.4.1.	Planificación.....	30
5.4.2.	Diseño (soluciones a las demandas).....	30
5.4.3.	Prototipado	31
6.	Resultados	33
6.1.	Botones finales en la interfaz.....	33
6.2.	Escena de Menú Principal	37
6.3.	Escena de Edición.....	37
6.4.	Escena de Simulación.....	42
7.	Discusión.....	44
8.	Conclusiones y trabajo a futuro.....	46
9.	Referencias	46

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por ofrecerme una formación de calidad durante mi trayectoria universitaria.

Al laboratorio de Bioinstrumentación del ICAT, por brindarme un espacio que me permitió crecer tanto en lo académico como en lo personal. Especialmente agradezco al Dr. Miguel Ángel Padilla y al Dr. César Fabián Domínguez Velasco por su orientación paciente, sus aportaciones y el tiempo que dedicaron a este proyecto.

Dedico este trabajo con todo cariño a mi familia, por ser mi soporte emocional, creer en mí siempre y por apoyarme con amor en cada paso, sobre todo en los momentos más difíciles.

Finalmente, agradezco al proyecto SECTEI 087/2023 "Laboratorio de Simulación clínica y cirugía asistida por computadora" y al proyecto DGAPA-PAPIIT IN117425 "Investigación en integración de información anatómica, funcional y multispectral aplicado en un esquema de navegación quirúrgica por realidad aumentada", que han sido esenciales para la realización de esta investigación.

1. Resumen

Objetivo: Desarrollar una interfaz gráfica de usuario intuitiva que complemente al neuronavegador, elaborado en el laboratorio de Bioinstrumentación del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT), y que resuelva la necesidad de realizar la planeación preoperatoria de un procedimiento de ventriculostomía, que se refleje en la escena de realidad aumentada, manteniendo un diseño simple e intuitivo para los estudiantes y expertos del área de neurocirugía.

Métodos: El neuronavegador desarrollado por el laboratorio de Bioinstrumentación del ICAT permite la alineación de los objetos que se encuentran dentro de la escena virtual y física, haciendo el monitoreo de los objetos mediante un equipo de seguimiento óptico comercial, una cámara estéreo, una herramienta de punción y un modelo craneal impresos, y un módulo de trabajo con el software.

Para la estructuración del proyecto se siguió la metodología del Diseño Centrado en el Usuario (DCU), abarcando solo las fases de planificación, diseño y prototipado. Al igual que el neuronavegador, la interfaz gráfica se desarrolló en la plataforma de *Unity* en la que se asignaron scripts creados en la plataforma de *Visual Studio* con el lenguaje *C#*, a botones, objetos y paneles, asegurando la compatibilidad con el sistema de navegación.

Las imágenes asignadas a los botones se ilustraron en la aplicación de *Procreate*, posteriormente fueron procesadas para ajustarse al estilo visual deseado y finalmente ser importadas a *Unity*. Los modelos anatómicos virtuales fueron segmentados en *3D Slicer* y se filtraron en *Blender*, con el objetivo de importarlos en la interfaz o imprimirlos en 3D componentes físicos del neuronavegador/simulador. En cambio, los objetos de marcaje 3D para la interfaz fueron generados directamente en *Blender*, para ser empleados como herramientas de edición en la escena de *Unity*.

Resultados: La interfaz desarrollada se compone de tres escenas (Menú Principal, Edición y Neuronavegador), en donde se distribuyen las funciones destinadas a satisfacer las necesidades del usuario final. Estas funciones se ejecutan principalmente por medio de botones que contienen las acciones programadas.

Estas funciones incluyen la importación de modelos anatómicos del caso clínico deseado, su edición mediante elementos de marcaje sobre el cráneo y ventrículos, el almacenamiento de los elementos añadidos y su visualización en la escena de navegación/simulación, con planos, marcas y guías superpuestos a los modelos anatómicos virtuales.

Con el objetivo de mejorar la usabilidad, se programaron recursos de asistencia, como descripciones breves que se despliegan al colocar el puntero sobre un botón, y un botón de “Ayuda” que proporciona la información detallada de los botones y orientación paso a paso del uso de la escena.

Conclusión: Se obtuvo una interfaz funcional que complementa el neuronavegador previamente desarrollado y soluciona las necesidades del usuario final, brindándole la opción de realizar la planificación preoperatoria según su criterio, que posteriormente se visualiza en el simulador de realidad aumentada del neuronavegador, garantizando que la interfaz sea eficaz, eficiente y satisfactoria para los expertos y estudiantes de neurocirugía.

2. Introducción

La ventriculostomía es un procedimiento neuroquirúrgico que permite drenar el exceso de líquido cefalorraquídeo (LCR) del sistema ventricular mediante la inserción de un catéter, esta intervención se indica principalmente en casos donde se presenta el aumento de la resistencia a la circulación de LCR, la sobreproducción del mismo o una disminución en su absorción, alteraciones que surgen comúnmente en pacientes pediátricos que presentan malformaciones congénitas en el sistema nervioso o el cerebro (García & Castillo, 2015).

Tradicionalmente el procedimiento se realiza mediante técnicas manuales, guiadas por puntos de referencia anatómicos. Sin embargo, a pesar del cuidado puesto en las mediciones, estas técnicas generan un alto porcentaje de errores debido a la anatomía del paciente, las habilidades del médico o dificultades intraoperatorias, aumentando el riesgo de una colocación incorrecta del catéter, así como el número de intentos necesarios para alcanzar el punto objetivo (Raabe et al., 2018), lo que podría derivar en diversas complicaciones durante y posterior a la intervención, lo que puede ocasionar obstrucciones, desconexiones en el sistema, infecciones, hemorragias o lesiones directas. Por ello, las investigaciones recientes han implementado técnicas de navegación asistida, tales como la navegación

electromagnética y guiada por imagen, que han demostrado ser una herramienta eficaz en la planificación y guía intraoperatoria (Alizadeh et al., 2024).

Como parte de la evolución tecnológica, se ha destacado la importancia del estudio previo de imágenes para seleccionar al paciente adecuado y planificar la intervención, permitiendo identificar variaciones anatómicas en la forma del tercer ventrículo, el grosor de su piso, la forma de la arteria basilar, y el tamaño del foramen de Monro y los ventrículos laterales, factores que podrían aumentar la dificultad del procedimiento (Lane & Akbari, 2022). Sin embargo, a pesar de los avances en las técnicas de navegación asistida, se ha promovido el desarrollo de navegadores que integren la realidad aumentada, con el fin de facilitar la visualización de los modelos anatómicos en 3D, tanto en la etapa preoperatoria como durante el procedimiento, lo que permite una planeación detallada y una formación médica más completa.

Los avances en realidad aumentada (RA) han permitido desarrollar navegadores quirúrgicos más completos, capaces de superponer elementos virtuales sobre un entorno físico, facilitando la planificación y visualización intraoperatoria. También son una herramienta importante en la formación médica, que permite a los residentes practicar repetidamente la intervención en un entorno seguro y fiel al procedimiento real (Bruno et al., 2022). Los simuladores basados en RA han sido efectivos en procedimientos neuroquirúrgicos como la ventriculostomía donde se requiere una alta presión al insertar el catéter. Además, estos simuladores permiten visualizar estructuras internas cerebrales, identificar puntos de referencia y reducir el porcentaje de error (Alizadeh et al., 2024),

Para que un sistema de neuronavegación con realidad aumentada, sea realmente funcional en procedimientos de ventriculostomía, tanto en un contexto clínico como educativo, es necesario que permita la identificación de estructuras anatómicas y la edición por el usuario, con elementos de marcaje como puntos, planos de referencia y trayectorias. En una ventriculostomía, estos elementos pueden ser esenciales para la determinación del punto de inserción y la ruta adecuada del catéter, además deben mantenerse fijos durante todo el procedimiento, lo que ayudará a disminuir la posibilidad de un desplazamiento incorrecto del catéter. Por ello, es importante que un neuronavegador cuente con una interfaz gráfica de

usuario (GUI) que habilite la edición de diversos casos clínicos y configuración de los elementos de marcaje para la navegación por parte de expertos y residentes en neurocirugía.

Aún si el desarrollo funcional del software es ideal, la GUI es el puente entre la tecnología y el experto, es decir, que a través de la interfaz el usuario interactuará con el sistema, por lo tanto, el diseño de la interfaz de usuario no debe dejarse en segundo plano. Una interfaz intuitiva, simple y centrada en las necesidades del usuario asegura una experiencia fluida y reduce el tiempo de adaptación al sistema (Albornoz, 2014). Por lo que, en un ámbito médico, una GUI bien diseñada definirá si un sistema de navegación se adoptará exitosamente en la práctica clínica y educativa diaria.

3. Planteamiento del problema

3.1. Justificación

En el Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT) de la UNAM, se encuentra en desarrollo un sistema de navegación neuroquirúrgico que integra realidad aumentada, orientado específicamente al procedimiento de ventriculostomía. Actualmente, el sistema solo permite visualizar en tiempo real el desplazamiento del catéter virtual alineado con su correspondiente modelo físico, alrededor de los modelos anatómicos importados. Además, el sistema carece de funciones para establecer o editar puntos, referencias anatómicas ni para definir una trayectoria personalizada, mostrando únicamente una ruta preestablecida que no puede modificarse.

Por ello, se propone el desarrollo de una interfaz de usuario intuitiva que aumente las capacidades del sistema de navegación, permitiendo su aplicación tanto en la etapa de planificación como en la intervención quirúrgica, adaptándose al caso clínico seleccionado por el usuario. La incorporación de funciones para la identificación de puntos facilitará al especialista señalar múltiples zonas objetivo. Asimismo, la posibilidad de establecer referencias anatómicas mejorará la orientación espacial dentro del modelo anatómico y facilitará el trazo de trayectorias más precisas. Mientras que la opción de definir trayectorias de punción personalizadas brindará al usuario la oportunidad de experimentar con distintas alternativas y seleccionar la más adecuada.

Por lo tanto, es fundamental desarrollar una interfaz que permita a residentes y neurocirujanos expertos, interactuar de manera intuitiva con el sistema de navegación y la realidad aumentada, sin comprometer la precisión requerida. Un diseño centrado en la experiencia de usuario, que incorpore únicamente las funciones necesarias, mantenga un entorno intuitivo y asegure la coherencia lógica entre sus elementos, puede disminuir la confusión o frustración que podría provocar el rechazo a adoptar nuevas tecnologías de parte de residentes y expertos en neurocirugía (Ramírez-Acosta, 2017).

3.2. Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es desarrollar una interfaz gráfica que complemente al neuronavegador/simulador con realidad aumentada, previamente creado por el laboratorio de Bioinstrumentación del ICAT, con el fin de ampliar su utilidad como herramienta de apoyo en la enseñanza y planeación quirúrgica tradicional en procedimientos de ventriculostomía. Además, se prioriza conservar un entorno intuitivo que facilite el entendimiento del sistema por parte de especialistas y residentes en neurocirugía.

3.2.1. Objetivos específicos

- Incorporar en el entorno una función que permita al usuario establecer y modificar puntos fiduciaros sobre el modelo anatómico importado.
- Integrar al sistema de navegación una función que facilite establecer guías mediante planos sagital, coronal y axial, así como su modificación.
- Agregar al sistema de navegación la capacidad de establecer y modificar trayectorias de punción ventricular.
- Habilitar en el sistema la opción de cargar modelos anatómicos 3D correspondientes al caso clínico que desee el usuario.
- Habilitar la capacidad de control total sobre la vista de la escena para facilitar la edición precisa de la escena.
- Agregar elementos interactivos que sirvan como apoyo al usuario durante la interacción con la interfaz y el simulador.
- Permitir el guardado de las ediciones hechas sobre los modelos anatómicos.
- Visualizar las ediciones realizadas con puntos, planos y trayectorias dentro de la escena del neuronavegador, integradas al entorno de realidad aumentada.

4. Marco Teórico

Una simulación en un entorno clínico consiste en la creación de un modelo, espacio o configuración, ya sea física o virtual, que replica una actividad específica (en este caso, una ventriculostomía), que permite desarrollar y mejorar habilidades dentro de un entorno seguro, sin poner en riesgo a un paciente. Este tipo de entorno facilita la planeación preoperatoria, la toma de decisiones clínicas y el entrenamiento visoespacial, contribuyendo así a reducir errores durante las primeras prácticas con pacientes reales (Martínez-Anda et al., 2016).

Los modelos de simuladores se pueden categorizar en cuatro tipos (Harrop et al., 2013):

- **Físicos:** permiten la manipulación directa mediante el contacto físico del sistema (por ejemplo, modelos cadavéricos o modelos impresos en 3D).
- **Realidad virtual:** generados por computadora y controlados a través de dispositivos de retroalimentación óptica, táctil o auditiva.
- **En línea:** son modelos de autoevaluación que se encuentran en internet, que proporcionan la resolución de problemas clínicos y la toma de decisiones.
- **Híbridos:** combinan características de los modelos anteriores.

El ANGIO Mentor de Simbionix (especializado en la simulación de colocación de stents y manejo de estructuras vasculares cerebrales), el simulador AneurysmBox de UpSurgeOn (que ofrece cinco casos de aneurismas que pueden cliparse repetidamente) y el NeuroVR de CAE (que reproduce los procedimientos neuroquirúrgicos abiertos y la cirugía endoscópica cerebral) son ejemplos de simuladores actualmente disponibles en el mercado, utilizados como herramientas clave en la enseñanza y práctica neuroquirúrgica.

4.1. Ventriculostomía

La ventriculostomía es un procedimiento neuroquirúrgico que consiste en la colocación de un catéter abierto a través del cráneo hasta un ventrículo del cerebro, con el objetivo de derivar el líquido cefalorraquídeo (LCR) hacia un sitio donde se pueda absorber adecuadamente (Figura 1a) (Kreutzer et al., 2018). El sistema de derivación está constituido por una válvula y un catéter distal, y comúnmente se coloca en el peritoneo o el atrio cardiaco (Chater et al., 2010).

Las derivaciones pueden dividirse en tres tipos: temporales, como el drenaje ventricular externo utilizado en hidrocefalias por trauma o hemorragias; permanentes, como la derivación ventrículo-peritoneal y del ventrículo-atrial; y endoscópicas, recomendadas para hidrocefalias obstructivas. Por su ubicación, también se pueden dividir en derivaciones internas, que redirigen el líquido a otro espacio corporal, y externas, que lo conducen fuera del cuerpo (García & Castillo, 2015).

Las referencias espaciales son elementos indispensables en la planeación preoperatoria ventricular, ya que permiten ubicar con precisión puntos de inserción y definir la trayectoria del catéter. Las referencias anatómicas más utilizadas son (García & Castillo, 2015):

- Kocher: se toma como referencia el canto interno del ojo ipsilateral (dirección coronal) y zona pretragal (dirección sagital).
- Frazier: orientada a la glabella, paralela a la base del cráneo (con profundidad de 7-12 cm).
- Keen: perpendicular a la corteza, se coloca a 4-5 cm de inserción del catéter.
- Dandy: ubicada a 3 cm por encima del inión y 2 cm lateral a la línea media sagital.

4.1.1. Drenaje ventricular externo (DVE)

La colocación de un drenaje ventricular externo (DVE) es uno de los procedimientos más comunes en las unidades de cuidados intensivos neurológicos, ya que diversas lesiones pueden provocar un aumento en la presión intracraneal (PIC). Este procedimiento permite desviar el LCR y la sangre intraventricular, administrar medicamentos y monitorizar continuamente la PIC.

La inserción se hace aproximadamente en el punto de Kocher (Figura 1b), que se ubica trazando una línea media desde el nasión hasta un punto situado 10 cm posterior, y desde allí otra línea perpendicular hacia un punto ubicado 3 cm lateralmente siguiendo la línea media pupilar ipsilateral, evitando el seno sagital y la tira motora de la corteza frontal. El catéter se introduce a una profundidad máxima de 7 cm, con orientación coronal hacia el canto medial del ojo ipsilateral, y en el plano anteroposterior, 1.5 cm por delante del trago, hacia el foramen de Monro (Figura 1c) (Muralidharan, 2015). Esta es una técnica temporal, utilizada hasta que

el paciente esté en condiciones de recibir una derivación permanente o someterse a un proceso endoscópico.

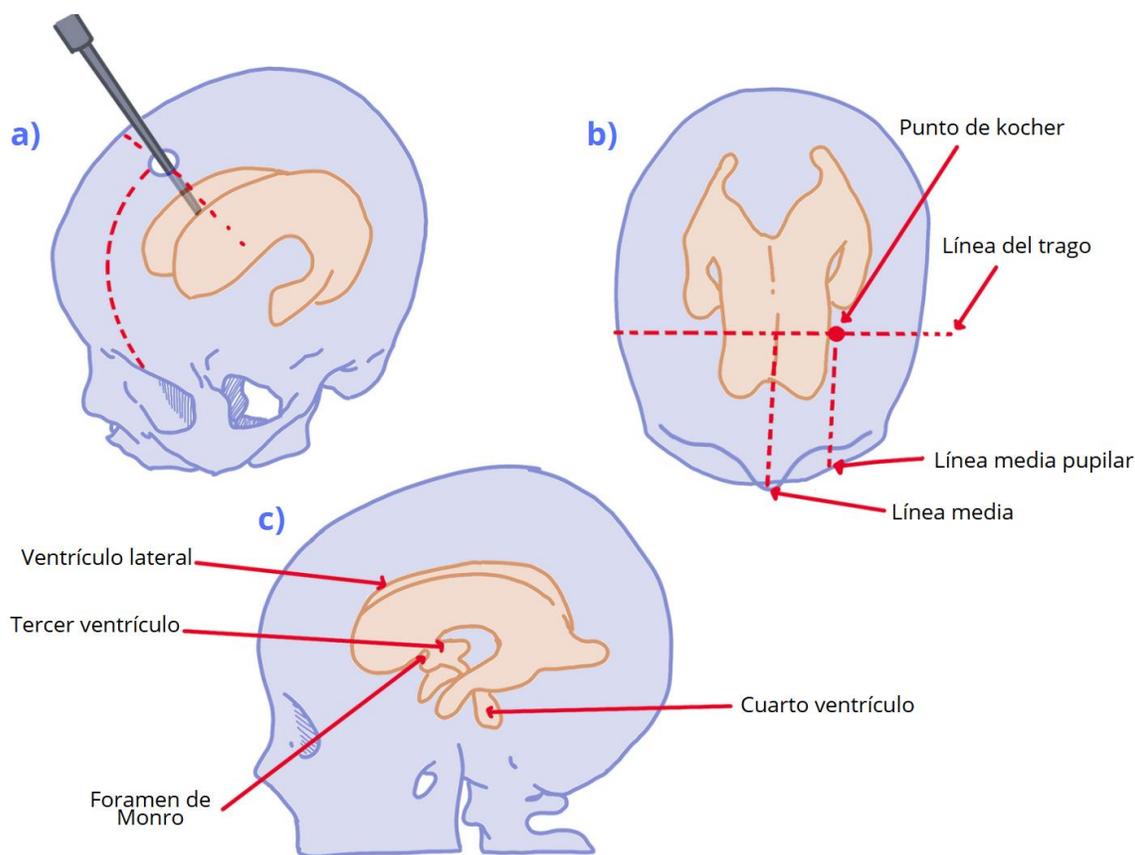


Figura 1. Puntos clave en una ventriculostomía. Los diagramas muestran de una forma simplificada a) la inserción del catéter en los ventrículos, b) guías para la localización del punto de Kocher y c) ubicación anatómica del foramen de Monro (Fuente: elaboración propia).

4.1.2. Ventriculostomía endoscópica del tercer ventrículo (ETV)

Es una técnica que se emplea comúnmente en pacientes con hidrocefalia no comunicante, asociada a una alteración en la reabsorción del LCR, como ocurre en pacientes con obstrucción en el flujo del líquido provocada por un tumor o por estenosis adquirida del acueducto de Silvio (García & Castillo, 2015).

El procedimiento consiste en la introducción de un endoscopio que navega hasta el tercer ventrículo. La trayectoria óptima hacia esta cavidad, atravesando el foramen de Monro y la cisterna interpeduncular, se determina a partir del orificio de trepanado, ubicado por delante de la sutura coronal y aproximadamente a unos 2.5-3 cm lateral a la línea media. A su vez el

foramen de Monro se localiza por la intersección anatómica entre la vena tálamo estriada, la vena septal y los plexos coroideos. La perforación en el piso del tercer ventrículo se realiza tras el paso del endoscopio a través del foramen de Monro (Yadav et al., 2012).

El porcentaje de éxito de este procedimiento varía entre el 40% y el 87%, dependiendo de la adecuada selección de caso clínico, la experiencia del cirujano y los cuidados posoperatorios (Yadav et al., 2021).

4.1.3. Drenaje Ventricular peritoneal shunt (DVP)

Durante este procedimiento se realiza la incisión en la piel y el trepanado del cráneo, mientras se lleva a cabo el abordaje abdominal y la tunelización, que consiste en conectar ambas incisiones (craneal y abdominal) por un instrumento de tunelización. Posteriormente, se realiza la punción ventricular, introduciendo el catéter en dirección al punto de intersección de diversas referencias anatómicas, como el punto de Kocher (definido por el trago ipsilateral, los ejes sagital y coronal, el foramen de Monro, el punto de Frazier y el punto de Dandy), hasta atravesar el epéndimo y permitir la salida del LCR. Finalmente, se conecta el catéter ventricular al reservorio del sistema de derivación y se confirma la salida del líquido por el extremo distal del catéter, ubicado en la cavidad abdominal (García & Castillo, 2015).

Aunque es uno de los tratamientos principales para la hidrocefalia, presenta un alto porcentaje de fracaso. En Estados Unidos se implantan más de 30,000 sistemas de derivación al año, de los cuales entre el 11 y el 25% fallan dentro del primer año, lo que obliga a realizar revisiones recurrentes a lo largo de la vida del paciente (Rei et al., 2024).

4.1.4. Complicaciones por la colocación del drenaje ventricular

- **Obstrucciones:** Puede presentarse en cualquiera de sus extremos, generalmente por la acumulación de proteínas, tejido del parénquima cerebral o células tumorales (Téllez Isla et al., 2021).
- **Desconexiones:** Puede ocurrir en cualquier punto del sistema de derivación, afectando su funcionamiento adecuado.
- **Migración:** El desplazamiento del catéter puede ocasionar disfunción del sistema, ya sea por alteraciones en la absorción de LCR o bloqueos del catéter.

- Infecciones: Constituyen la segunda causa más frecuente del mal funcionamiento de la derivación.
- Erosión de la piel: Normalmente se presenta en pacientes que se encuentran muy débiles.
- Sobre drenaje: Suele estar asociado con la formación de hidromas subdurales o con el síndrome de colapso ventricular.
- Drenaje insuficiente: Ocurre cuando la presión de apertura valvular es inadecuada o por obstrucciones en el sistema (Téllez Isla et al., 2021).
- Diseminación metastásica: En ciertos casos, el sistema puede ser vía de metástasis para ciertos tumores (Greenberg, 2013)

4.2. Realidad Aumentada

La Realidad Aumentada (RA) es una variación de la Realidad Virtual (RV), en el caso de la RV el usuario se sumerge completamente en un entorno sintético, perdiendo la percepción del mundo real que lo rodea. Por el contrario, la RA se enfoca en integrar, en tiempo real, elementos virtuales dentro del entorno real. Esta integración se logra mediante la sobreposición de capas de información virtual que deben alinearse de forma precisa con la imagen del mundo real.

El principal problema que se presenta en los sistemas de RA es el llamado “registro”, que consiste en el cálculo de la posición relativa de la cámara real respecto a la escena, con el objetivo de generar imágenes virtuales perfectamente alineadas con la realidad (González et al., 2011).

4.3. Interfaz de Usuario

La interfaz de usuario (UI) es el medio por el cual los usuarios se comunican con la computadora. Traduce las acciones del usuario y las entradas para que la computadora pueda procesarlas, y a su vez convierte las respuestas y salidas de la computadora en información que el usuario pueda entender y utilizar (La Viola, Jr. et al., 2017). Como se mencionó anteriormente, la interfaz de usuario consta dos componentes principales: la entrada, como el teclado, el ratón, el trackball, pantallas táctiles y comandos de voz; y la salida, principalmente la pantalla, que es el medio por el cual la computadora transmite los resultados al usuario.

Una interfaz de usuario que está bien diseñada debe ser accesible para cualquier persona, independientemente de sus conocimientos previos. Para lograr una interfaz usable, debe contar con las siguientes características (Albornoz et al., 2017):

- Satisfacción: que el entorno sea cómodo y agradable para el usuario.
- Efectiva: que la interfaz realice correctamente las funciones esperadas.
- Eficiencia: que permita completar las tareas en el momento adecuado y sin errores.

Los elementos principales de una UI pueden clasificarse en las siguientes categorías (Figura 2) (Bergström & Hornbæk, 2025):

- **Dispositivos:** Detectan las acciones del usuario y muestran representaciones, es decir, transforman la información física en formato digital para la operación de componentes y viceversa. Son los puntos físicos de contacto entre el usuario y la UI (ejemplos: sensores de movimiento, botones, pantallas táctiles).
- **Técnicas de interacción:** Son los métodos que vinculan las acciones detectadas por los dispositivos con las operaciones de los ensamblajes (ejemplos: señalamiento, selección y manipulación).
- **Representaciones:** Formas de representación del usuario (ejemplo: un cursor o un avatar) y a la computadora (ejemplos: iconos o texto), estas ayudan a comunicar los estados y cambios del usuario o de la computadora.
- **Ensamblajes:** Son las estructuras que organizan los elementos visuales y coordinan las acciones del usuario con las respuestas del sistema (ejemplo: un directorio, la disposición de los iconos en un escritorio, la ubicación del contenido en una ventana del navegador).

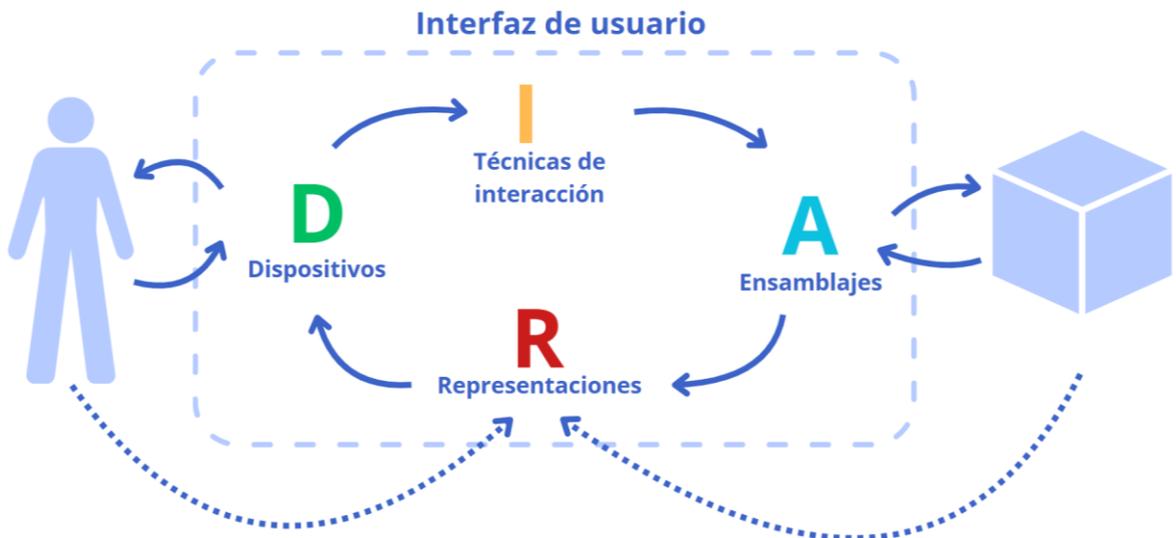


Figura 2. Elementos del modelo DIRA y la relación entre ellos. (Fuente: elaboración propia con información de Bergström & Hornbæk, 2025)

4.3.1. Interfaz gráfica de usuario (GUI)

Es una interfaz visual e interactiva que no se basa únicamente en comandos o texto, sino que utiliza herramientas visuales con ventanas, íconos, menús y dispositivos apuntadores que facilitan la interacción (Figura 3) (Hsu et al., 2017). Las GUI están presentes en prácticamente todos los entornos digitales modernos, incluyendo sistemas operativos (Windows, macOS, Linux), aplicaciones móviles y de escritorio (WhatsApp, Paint, Chrome), videojuegos, simuladores y dispositivos electrónicos.



Figura 3. Ejemplificación de interfaces gráficas de usuario. Se muestran ejemplos de las interfaces gráficas de usuario que se encuentran en a) un videojuego (fuente: elaboración propia), b) una página de ventas en internet, y c) en una aplicación que muestra la simulación de la inserción de un catéter ventricular llamada Vcath (Alizadeh et al., 2024).

4.3.2. Interacción humano-computadora (HCI)

Es el proceso mediante el cual el usuario (humano) interactúa con una computadora o cualquier tecnología interactiva. Se establece un canal de comunicación, donde el usuario comunica sus necesidades y la computadora responde proporcionando la información requerida para satisfacer dichas demandas (La Viola, Jr. et al., 2017).

4.4. Sistemas de navegación neuroquirúrgico

La neuronavegación es un método de tecnología avanzada que integra múltiples tipos de datos (anatómicos, neuroimagen, moleculares y neurofisiológicos) para evaluar la condición anatómica y funcional de un paciente, tanto antes como durante la intervención quirúrgica (Shurkhay et al., 2016). El sistema alinea las imágenes tridimensionales (obtenidas de resonancias magnéticas y tomografías computarizadas) con la anatomía del paciente, utilizando un sistema de coordenadas físicas en el quirófano y el registro (correspondencia de puntos entre las imágenes y el paciente), con el fin de facilitar la navegación quirúrgica (Moore & Newell, 2005).

Para definir este sistema de coordenadas físicas se emplean diferentes tecnologías, tales como (Moore & Newell, 2005):

- **Brazos mecánicos:** Se instalan a un costado de la mesa quirúrgica y determinan la posición de su extremo mediante los codificadores ubicados en cada uno de sus ejes. Su rango de movimiento es limitado, y además requieren realizar un nuevo registro cada vez que se reposicionan.
- **Localización ultrasónica:** Esta técnica utiliza transductores que emiten pulsos ultrasónicos breves, que son captados por micrófonos estratégicamente ubicados en el quirófano. El tiempo que tarda el pulso en llegar permite calcular la distancia y ubicar la fuente del sonido.
- **Rastreadores ópticos:** Determinan la posición tridimensional mediante cámaras lineales, que realizan el seguimiento de puntos activos (como diodos emisores de infrarrojo) o pasivos (esferas reflectantes). Es fundamental mantener la línea de visión directa entre las cámaras y los marcadores para garantizar una localización precisa.

En el ámbito de la neurocirugía, los neuronavegadores tienen múltiples aplicaciones, entre ellas: biopsias cerebrales, cirugía de lesiones corticales superficiales, intervenciones en la base del cráneo y la hipófisis, resección de tumores intrínsecos, mapeo funcional cerebral, tratamiento de malformaciones arteriovenosas, abordaje de aneurismas intracraneales, epilepsias, patologías espinales y procedimientos endoscópicos (Moore & Newell, 2005).

Además, su utilidad se extiende a otras especialidades médicas como en la cirugía ortopédica (colocación de implantes, reparación de fracturas), la cirugía otorrinolaringológica (cirugía de senos paranasales y cirugía del oído medio), la cirugía cardiovascular (reparación de aneurismas y tratamiento de malformaciones vasculares), así como la cirugía general y laparoscópica (resección de tumores hepáticos y cirugía pancreática).

4.5. Antecedentes y Estado del Arte

Roberta K. Sefcik (2017), presentó el uso de sistemas de neuronavegación 3D en neurocirugías endoscópicas, analizando su aplicación en la planificación preoperatoria, las ventajas intraoperatorias y los resultados obtenidos de la guía intraoperatoria mediante navegación, la precisión del registro, el desplazamiento cerebral y la prevención de complicaciones.

Mediante una búsqueda sistemática utilizando palabras clave, se obtuvieron 36 artículos relacionados, los cuales fueron revisados y analizados en su totalidad. A partir de esta revisión, se concluyó que el uso de la navegación 3D proporciona múltiples ventajas en la etapa de planificación quirúrgica, al permitir definir con mayor precisión el lugar de trepanación y predefinir la trayectoria operatoria, y durante el procedimiento quirúrgico, al facilitar la identificación de estructuras clave y ofrecer una guía intraoperatoria en tiempo real. Además, se reportó una reducción en la duración del procedimiento, una mayor precisión de la neuroendoscopia y la ausencia de complicaciones relacionadas con el aumento de presión intraoperatoria derivado del desplazamiento cerebral. (Sefcik et al., 2017)

Vianney Gilard (2017) realizó una comparación sobre la colocación de catéteres ventriculares tipo *shunt*, utilizando un neuronavegador electromagnético frente al método tradicional de colocación a mano libre. El estudio incluyó un grupo de 20 pacientes, dividido en dos grupos: uno intervenido con la asistencia de un navegador, y otro mediante el abordaje convencional a mano libre sin guía tecnológica. El principal criterio de evaluación fue la colocación óptima

del catéter, definida como la presencia de todos los orificios del catéter dentro del ventrículo, lo cual fue corroborado con una tomografía posoperatoria.

Los resultados mostraron que en el grupo asistido por neuronavegación se lograron 6 colocaciones óptimas de 10, en comparación con solo 1 de 10 en el grupo intervenido a mano libre. Los hallazgos prueban que el uso de los neuronavegadores mejora significativamente la precisión en la inserción del catéter ventricular, lo que contribuye a disminuir las complicaciones que se puedan presentar e incrementa la seguridad del paciente durante el procedimiento, (Gilard et al., 2017).

Mark Mahan (2013) llevó a cabo un ensayo en el que se evaluó la colocación de la DVE en treinta y cinco pacientes dentro de la Unidad de Cuidados Intensivos (UCI), utilizando un sistema de neuronavegación electromagnético. El estudio evaluó principalmente la precisión del procedimiento, la aparición de complicaciones y la duración de las ventriculostomías realizadas en las camas de la UCI. Los resultados indicaron que únicamente dos catéteres no fueron colocados de forma óptima en el asta frontal del ventrículo, y solo se registró un paciente con hemorragia del tracto. No obstante, se observó un aumento en el tiempo quirúrgico. A pesar de ello, se concluyó que la utilización de neuronavegadores minimiza la incidencia de colocaciones inadecuadas del DVE y podría reducir la aparición de hemorragias intracerebrales (Mahan et al., 2013).

Panayiotis E. Pelargos (2017), presentó una revisión de la evolución histórica de las tecnologías de RA y RV, con un enfoque particular en su aplicación en la formación de médicos residentes en neurocirugía. A raíz de los cambios en las restricciones sociales y económicas, ha sido necesario actualizar las metodologías de enseñanza, priorizando la seguridad del paciente como la posibilidad de repetir los procedimientos un número indefinido de veces.

Es así que la integración de la RV y RA en sistemas de navegación ha demostrado que los simuladores mejoran la planificación preoperatoria y el desarrollo de habilidades neuroquirúrgicas. La revisión concluye que las innovaciones en las técnicas de navegación y simulación han propiciado un avance sustancial en la formación neuroquirúrgica, lo cual se traduce en la mejora general en los resultados clínicos y en un aumento de la capacidad para salvar vidas. (Pelargos et al., 2017)

Yisen Huang (2022) desarrolló un sistema inteligente de endoscopia flexible, el cual detecta y clasifica en tiempo real los instrumentos quirúrgicos utilizados por el cirujano durante una intervención, el cual es controlado de acuerdo a sus preferencias personales. Para lograr el seguimiento automático de los instrumentos, se propuso un método basado en un cuadro delimitador orientado, con el fin de detectar la región de interés en el campo de visión y mantener el instrumento dentro de dicho campo, con un tamaño personalizado. El sistema alcanzó una precisión del 95.12% a una velocidad de 100 FPS. Los resultados del estudio concluyen que considerar las preferencias del cirujano durante el diseño de una GUI contribuye a una experiencia quirúrgica más eficiente y efectiva, adaptada a sus necesidades y habilidades (Huang et al., 2022).

Zeyang Zhou (2023), desarrolló un sistema de navegación neuroquirúrgico basado en realidad mixta (RM), que permite visualizar imágenes médicas en un entorno inmersivo (Figura 4). El sistema procesa imágenes médicas y reconstruye estructuras como vasos cerebrales y fibras nerviosas, conservando los colores adecuados. Una vez que se generan los modelos 3D, se integran con el paciente real o un maniquí, con un sistema de coordenadas compartido para guiar de manera precisa el procedimiento quirúrgico.

Tras múltiples pruebas realizadas en maniquíes, se obtuvo un promedio del 94.5% de áreas correctamente registradas. Además, cuando el sistema fue evaluado por cirujanos, estos reportaron un rendimiento sobresaliente, identificando un gran potencial en el área de la neurocirugía, ya que facilita la localización precisa y rápida del área objetivo y de los tejidos circundantes importantes. (Zhou et al., 2023)

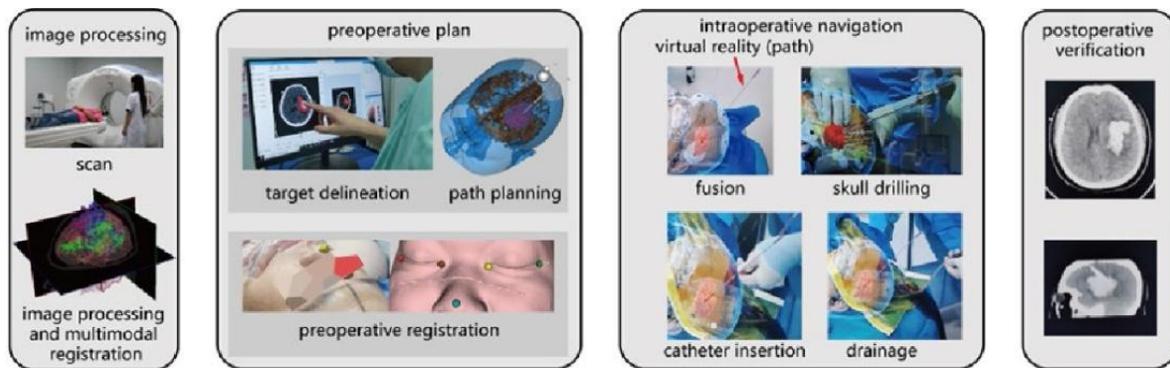


Figura 4. Experimentos en humanos, para validar la facilidad y efectividad (Zhou et al., 2023)

Xudong Ma (2024) llevó a cabo un estudio en el que comparó los resultados obtenidos en la colocación de derivaciones ventriculoperitoneales mediante el uso de navegación electromagnética (EM) frente a los métodos estándar, en pacientes con hidrocefalia idiopática normotensiva. El estudio se llevó a cabo con dos grupos: uno con 31 pacientes que fueron intervenidos utilizando puntos de referencia anatómicos convencionales y 50 mediante navegación guiada por electromiografía. La comparación entre ambos grupos se centró en evaluar la colocación y la incidencia de complicaciones postoperatorias (Figura 5).

Se observó que el grupo guiado por EM presentó un menor número de intentos de punción, una menor incidencia de hemorragias intraparenquimatosas, una reducción en el tiempo de operación y una menor frecuencia de complicaciones postoperatorias durante un seguimiento de dos años. Los resultados evidencian que la implementación de navegadores en la colocación de derivaciones ventriculares contribuye significativamente a aumentar la precisión y la seguridad en la colocación del catéter, al permitir una planificación individualizada del tratamiento. Asimismo, se observó una disminución en la tasa de disfunciones posoperatorias del sistema de derivación (Ma et al., 2025).

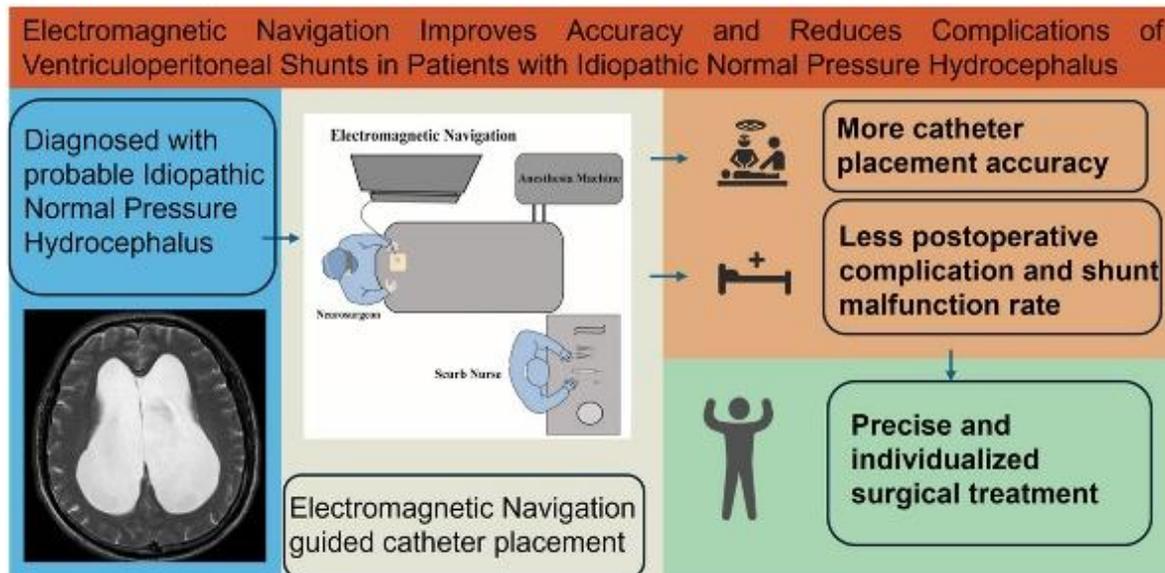


Figura 5. Resumen grafico del procedimiento. (Ma et al., 2025)

Ronny Grunert (2024) desarrolló un estudio de viabilidad en el que se evaluó la colocación de un DVE, comparando el uso de RM como sistema de navegación (mediante Microsoft HoloLens 2) frente a la técnica de colocación a mano alzada. Se realizó con dos grupos de

10 participantes, conformados por estudiantes de medicina sin experiencia en neurocirugía. Un grupo efectuó la DVE con el apoyo del sistema de RM, el cual proyectaba una trayectoria planificada previamente sobre un modelo cadavérico humano, mientras que el segundo grupo la realizó sin la asistencia de la RM. Posteriormente, se corroboró la posición real con una tomografía computarizada.

Los resultados mostraron una reducción del 54% del radio de dispersión del punto objetivo en el grupo que utilizó realidad mixta, en comparación con el grupo que realizó la ventriculostomía sin asistencia tecnológica. Los hallazgos confirman que la integración de tecnologías emergentes, como la realidad mixta, puede mejorar la precisión quirúrgica, aun si los cirujanos tienen o no experiencia previa (Grunert et al., 2024)

Jan Hombeck (2024) propone en su investigación una UI controlada por voz, con el objetivo de facilitar la interacción con entornos dentro de los sistemas de realidad virtual. Esto surge como respuesta a la limitación que representa el uso de las manos como principal medio de interacción, en procedimientos quirúrgicos donde estas ya se encuentran ocupadas. La implementación de una interfaz controlada por voz permitiría a los cirujanos navegar por los simuladores, interactuar con imágenes y controlar equipos, manteniendo la esterilidad.

En el estudio se realizaron pruebas con 21 participantes, quienes interactuaron con tres funciones principales sobre un objeto 3D: cambio de orientación, personalización (Figura 6) y análisis. Los resultados permiten concluir que la incorporación de métodos alternativos de entrada a una UI, como el control por voz, ofrece una alternativa prometedora para optimizar la interacción del usuario con sistemas de realidad virtual, al mejorar la eficiencia y comodidad en su uso (Hombeck et al., 2024).

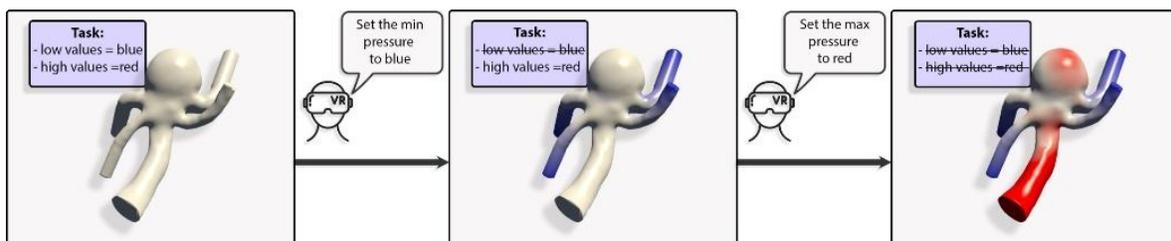


Figura 6. Demostración de una acción de personalización sobre el modelo 3D (Hombeck et al., 2024).

5. Metodología

Para el primer diseño de la interfaz se consideró como usuario final a los residentes y especialistas en neurocirugía, quienes requieren de una herramienta de navegación para una fase prequirúrgica (planeación/simulación) y transquirúrgica (navegación), utilizando casos reales y variados, obtenidos a partir de estudios de imagen por tomografía computarizada.

5.1. Obtención de anatomías 3D

Mediante el uso de archivos DICOM (Digital Imaging and Communications Medicine) de tomografías en casos reales y un software de procesamiento y segmentación de imágenes médicas (*3D Slicer image computing platform*, 2025; Fedorov et al., 2012), se obtuvieron los modelos 3D de los ventrículos y cráneo del paciente (Figura 10):

- Se empleó una técnica de umbralización (Threshold) para ajustar el contraste en las imágenes de tomografía computarizada. Mediante la selección de rangos específicos en la escala de grises (Figura 7), fue posible resaltar estructuras de interés como el hueso, cerebro, y ventrículos cerebrales. En particular, para la segmentación de los ventrículos se requirió un tratamiento adicional mediante filtros de suavizado Gaussiano y de mediana, dada a la dificultad para distinguir su contorno con precisión, debido a la variabilidad de los niveles de grises.

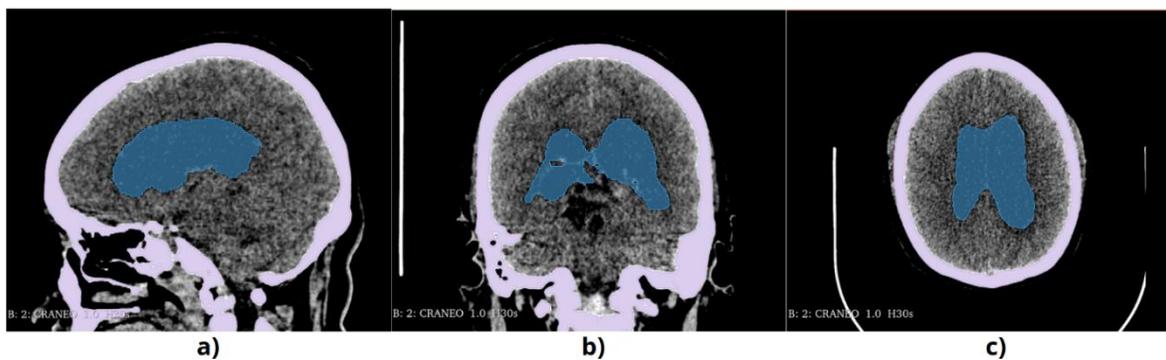


Figura 7. Áreas segmentadas, señaladas sobre las imágenes de tomografía en 3D Slicer, del cráneo y ventrículos en los planos a) sagital, b) coronal y c) sagital.

- Para obtener un modelo 3D más claro y libre de interferencias visuales, fue necesario remover artefactos generados durante la adquisición de las imágenes, tales como la cama del tomógrafo, la piel y otros elementos externos. La limpieza se llevó a cabo

mediante la herramienta de eliminación de islas, seleccionando únicamente los segmentos anatómicos que se requerían conservar (Figura 8).

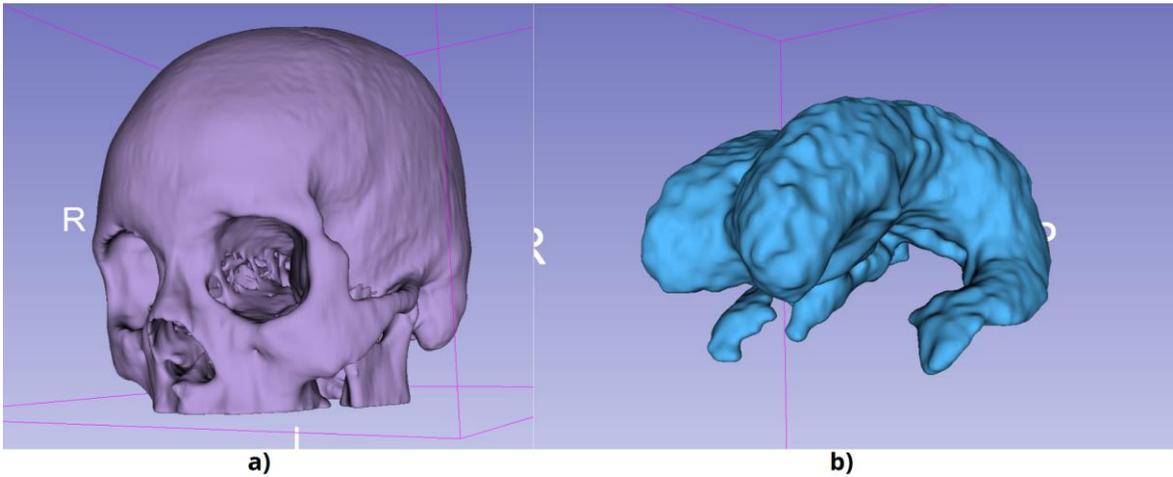


Figura 8. Modelos 3D obtenidos del a) cráneo y b) ventrículos.

- Finalmente, para mejorar la calidad del modelo 3D, se exportó desde 3D Slicer a Blender para eliminar protuberancias residuales, cerrar agujeros en la malla y disminuir el número de vértices sin alterar significativamente la geometría original, con el fin de optimizar su carga en la interfaz. Además, se ajustó la escala en centímetros y se aseguró que los modelos estuvieran correctamente posicionados (Figura 9).

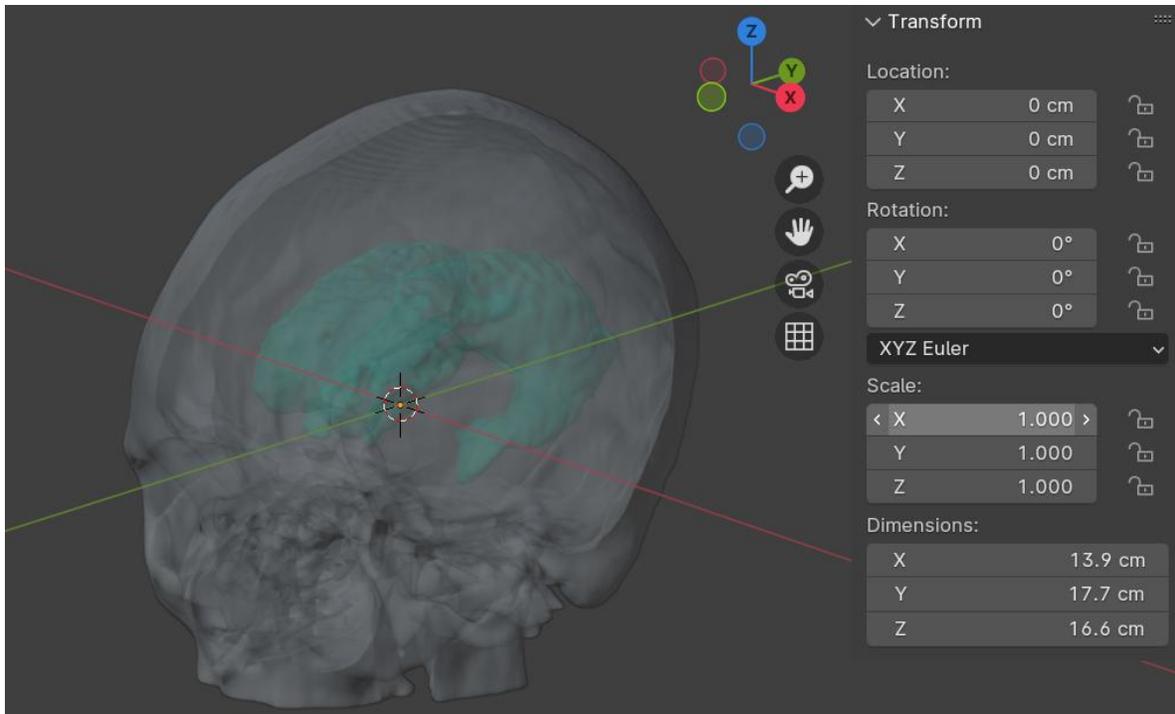


Figura 9. Modelo 3D del cráneo y ventrículos en Blender, con la escala, textura, posición y rotación ajustadas.

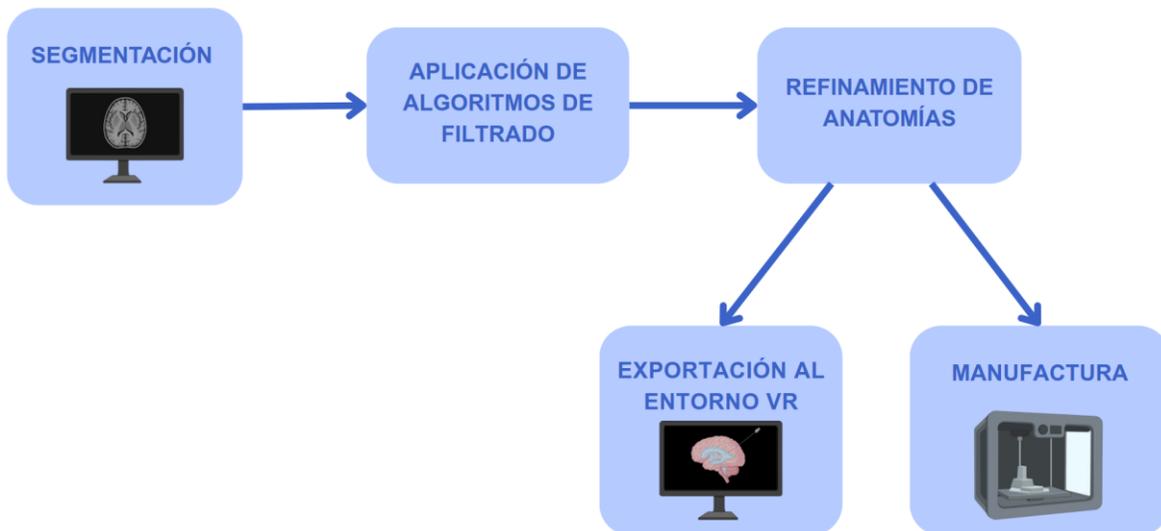


Figura 10. Procedimiento de obtención de anatomías 3D. (Fuente: elaboración propia)

5.2. Impresión 3D de los modelos

Una vez generado el modelo 3D virtual del cráneo, se procedió a su impresión 3D (Figura 11), mediante una impresora Prusa i3 MK3S y filamento PLA. El modelo impreso servirá como complemento físico del sistema de simulación y navegación.

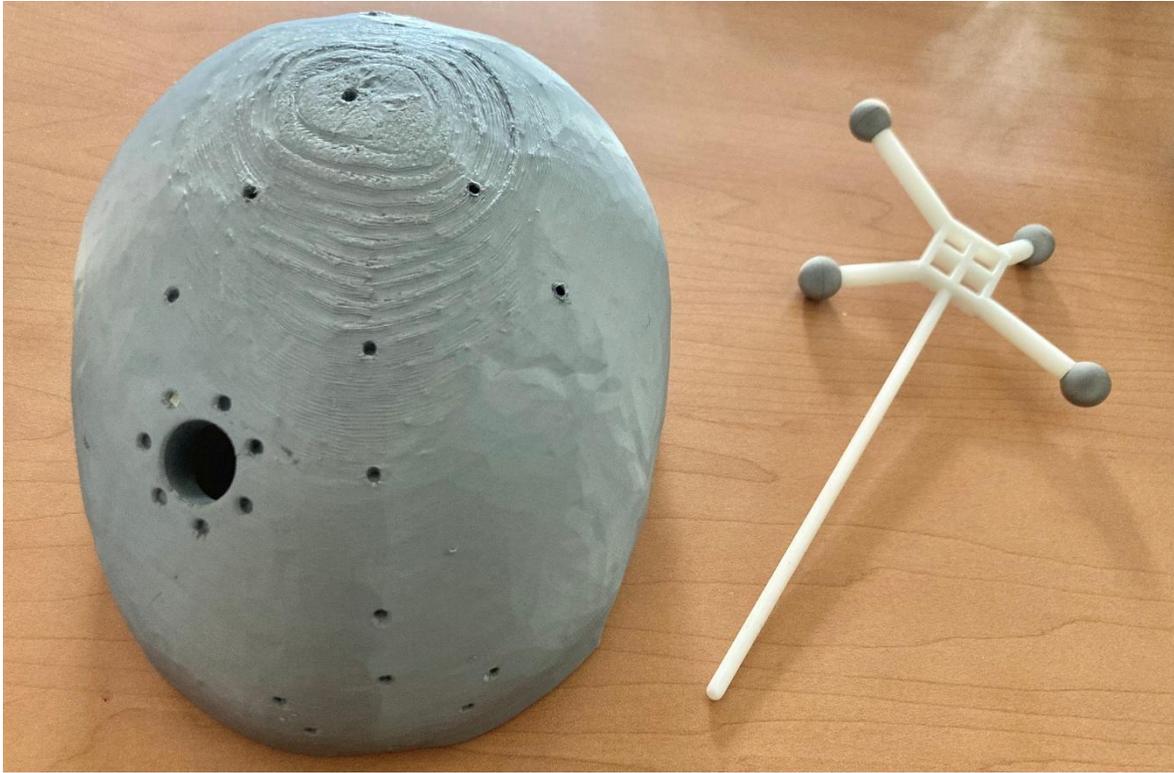


Figura 11. Modelos del cráneo y catéter impresos.

5.3. Navegador quirúrgico de ventriculostomía

El sistema de neuronavegación desarrollado en el Laboratorio de Bioinstrumentación está conformado por un brazo que sostiene el cráneo y permite modificar su posición, un equipo de seguimiento óptico comercial (Optitrack V120: Duo, Optitrack), una cámara estéreo (Zed Mini, Stereolabs), una herramienta de punción fabricada mediante impresión 3D y un módulo de trabajo, que integra el software de realidad aumentada (Figura 12).

El navegador permite seguir en tiempo real los objetos que se encuentran dentro de la escena física (cráneo, el brazo, la cámara estéreo y el catéter), mientras que en la escena virtual se visualizan los modelos 3D (cráneo, ventrículos y catéter), el punto Kocher, el agujero de Monro y tres líneas guía (Domínguez-Velasco et al., 2023).

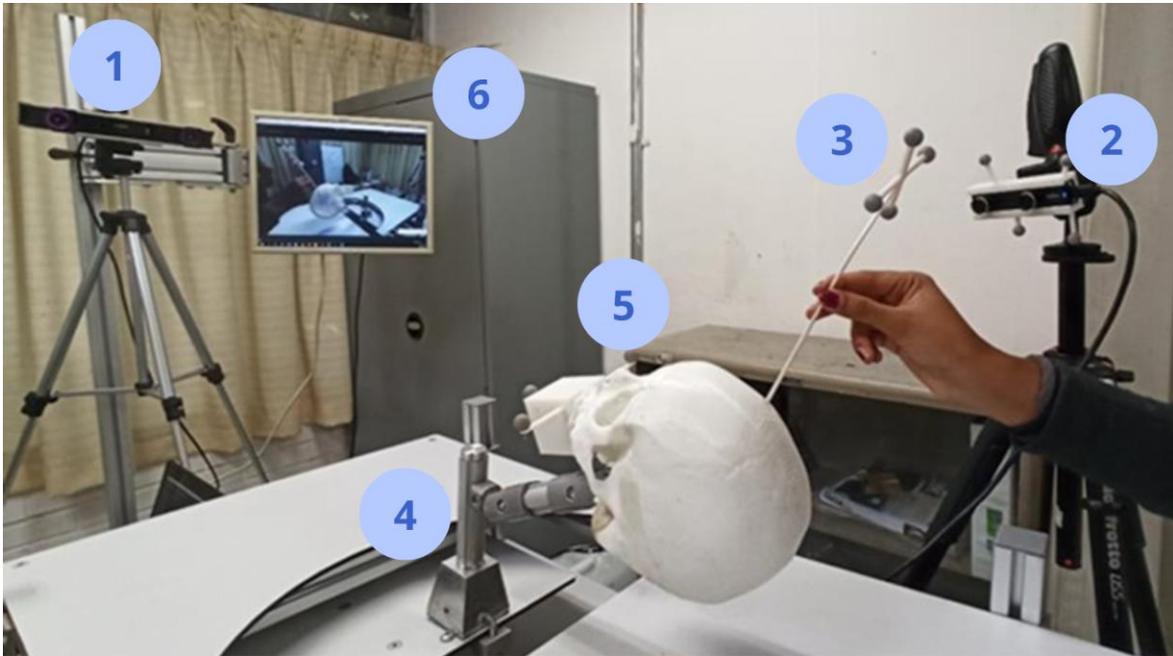


Figura 12. Instalación completa del simulador: 1) equipo de seguimiento óptico, 2) cámara estéreo, 3) herramienta de punción, 4) brazo de soporte, 5) cráneo impero en 3D y 6) monitor (modulo de trabajo). (Domínguez-Velasco et al., 2023)

La alineación de los objetos virtuales con los reales se realiza mediante un método de alineación de mínimos cuadrados, que considera dos nubes de puntos (matrices de 3×3), correspondientes a las esferas reflectantes localizadas en los modelos físicos y sus equivalentes virtuales. Este proceso se implementa utilizando el algoritmo SVD (Singular Value Decomposition), a partir del cual se calculan las matrices de rotación y traslación de la relación entre puntos. Una vez calculadas e integradas estas matrices de forma continua en el entorno desarrollado en *Unity*, se logra la alineación precisa de ambas escenas (Figura 13).

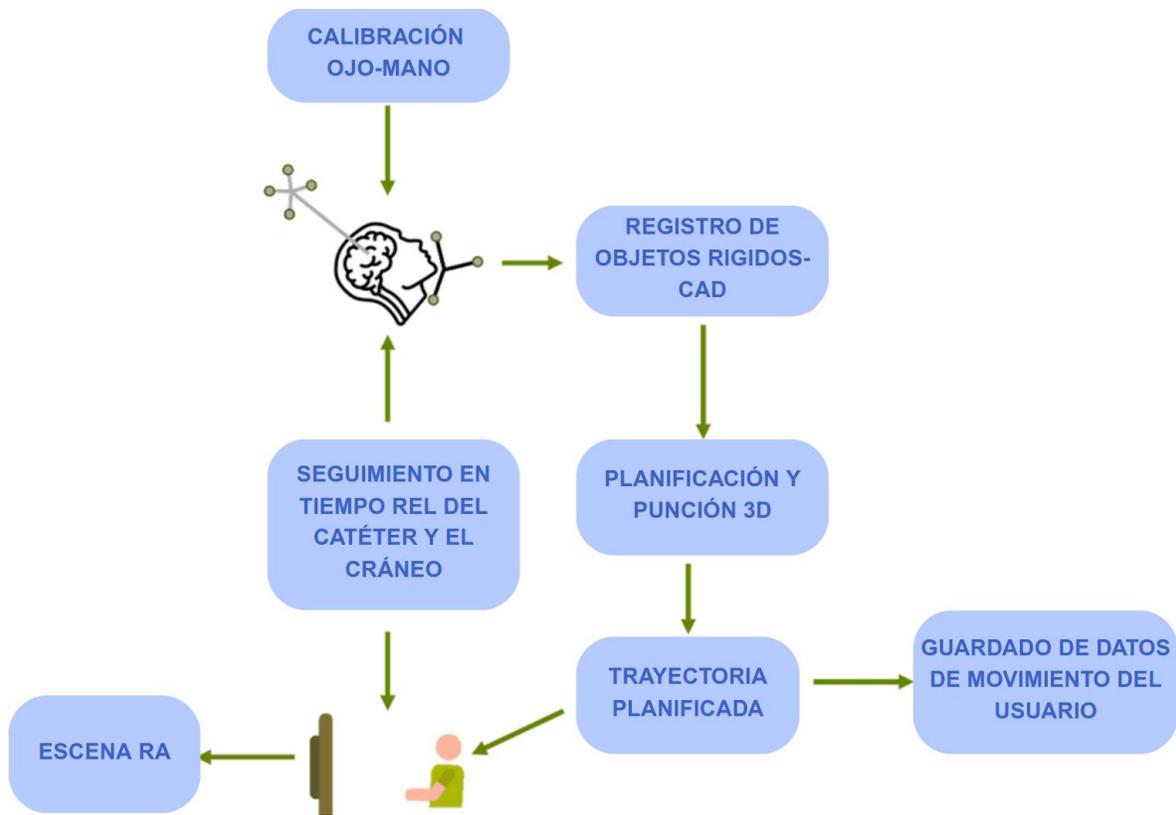


Figura 13. Diagrama del flujo de datos generado en el navegador (Dominguez-Velasco et al., 2023)

5.4. Diseño de la Interfaz de usuario

Para el desarrollo de la interfaz de usuario se empleó *Unity*, una plataforma de desarrollo y motor de videojuegos, que también se utilizó para implementar la realidad aumentada en el neuronavegador. Esta elección permitió evitar posibles problemas de compatibilidad e integración entre componentes.

Se adoptó la metodología del diseño centrado en el usuario (DCU) como enfoque principal para el desarrollo de la interfaz. Sin embargo, debido a que el proceso aún se encuentra en una fase inicial, únicamente se abordaron las primeras etapas: planificación, diseño y prototipado, (Figura 14).

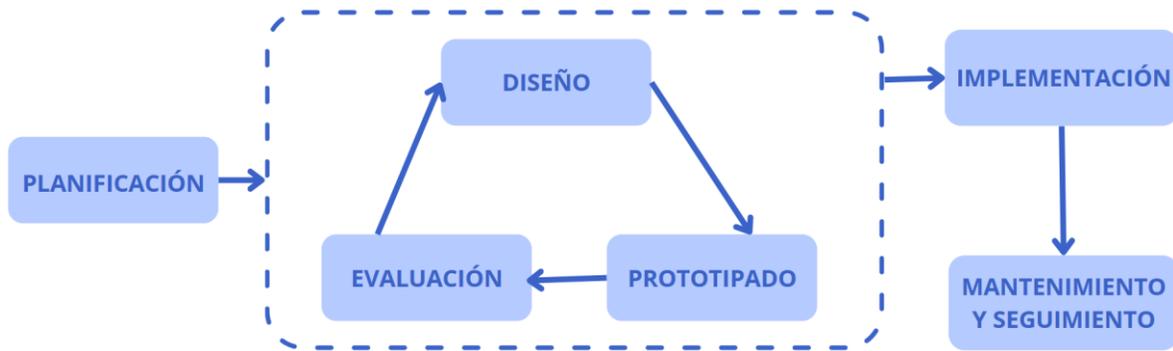


Figura 14. Diagrama de las etapas del DCU (Fuente: elaboración propia con información de Albornoz et al., 2017).

5.4.1. Planificación

- La interfaz está orientada a residentes de neurocirugía, quienes generalmente cuentan con conocimientos limitados en programación y programas de desarrollo virtual.
- Es fundamental que la interfaz sea intuitiva, efectiva y eficiente, para facilitar su uso sin requerir formación técnica especializada.
- Debe permitir la planificación preoperatoria, facilitándole al usuario definir la trayectoria del catéter y marcar puntos anatómicos clave para el procedimiento.
- Debe contar con la funcionalidad de cargar distintos casos de pacientes clínicos, lo que permitirá a los usuarios practicar con diversos casos.
- La planificación realizada debe ser visible dentro del entorno de simulación/navegación, para que el usuario pueda realizar el proceso quirúrgico en un entorno controlado.

5.4.2. Diseño (soluciones a las demandas)

La interfaz fue dividida en tres escenas funcionales: menú principal, edición destinada a la planificación preoperatoria, y la escena de simulación/navegación donde se lleva a cabo la alineación del modelo físico con el virtual:

- Se propone el diseño de una interfaz que incorpore iconos visuales que representen de forma clara y sencilla la función que desempeñan. Estos íconos serán creados específicamente para adaptarse al entorno gráfico de la interfaz.

- En caso de que el usuario requiera de una explicación más detallada sobre el funcionamiento de los elementos de la interfaz, se le habilitará un botón de “Ayuda”, el cual mostrará descripciones ampliadas de cada componente, así como sugerencias para un uso adecuado, organizadas por pasos. Esta función estará disponible durante toda la interacción.
- Para facilitar la planificación preoperatoria, se le permitirá al usuario agregar objetos tridimensionales, como esferas y cilindros, para señalar puntos clave y definir trayectorias relevantes. Asimismo, se podrán incorporar planos que ayuden a determinar la ubicación precisa de dichos elementos. Todas las guías, marcas y planos podrán editarse y reubicarse según las necesidades del usuario.
- En la interfaz se permitirá la importación y edición de los modelos 3D seleccionados por el usuario, siempre que estos correspondan al formato del archivo compatible (.obj).
- Una vez que se añadan las guías, marcas y planos, su posición y rotación se almacenarán en un archivo de tipo Json, permitiendo su recuperación en futuros proyectos o su visualización durante la fase de simulación/navegación.

5.4.3. Prototipado

- Scripts:** Los algoritmos que controlan el comportamiento de los botones y el entorno interactivo de la interfaz fueron desarrollados en *Visual Studio* utilizando el lenguaje de programación de C#. Estos scripts permiten la selección y edición de los objetos, así como la carga y el guardado de los modelos 3D tras su modificación, contribuyendo a mejorar la experiencia haciéndola más cómoda y funcional.
- Botones:** Las imágenes en los botones fueron diseñadas en la aplicación *Procreate*, especializada en ilustración digital. Posteriormente, se invirtieron los colores en la plataforma de *Fiji* para facilitar la eliminación del fondo en la página web de *Remove.bg*. Por último, las imágenes fueron importadas a *Unity*, donde se ajustó el parámetro Texture Type a Sprite (2D and UI) para su asignación a los botones correspondientes (Figura 15).

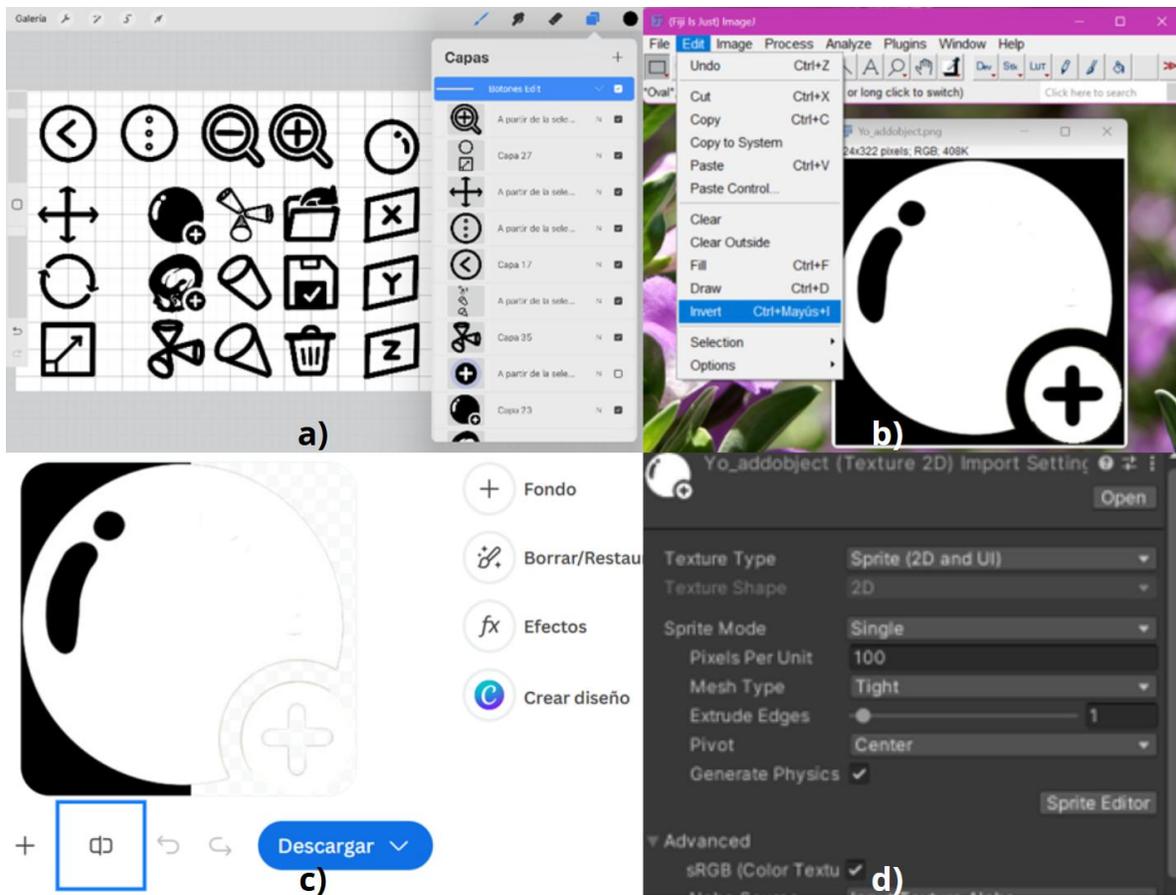


Figura 15. Procesamiento de las imágenes para los botones. a) Botones dibujados en Procreate, b) colores invertidos en Fiji. c) se elimina el fondo de las imágenes y d) se importan a Unity.

c) **Objetos 3D extras:** Los objetos incorporados en la escena, tales como las marcas (esferas), guías (cilindros), y planos fueron desarrollados en el software de Blender y exportados en formato Collada (.dae) para garantizar su compatibilidad con los scripts y modificación en Unity. Una vez importados, los objetos se convirtieron en Prefabs, permitiendo su control dinámico a través de los scripts desarrollados para la interfaz (Figura 16).

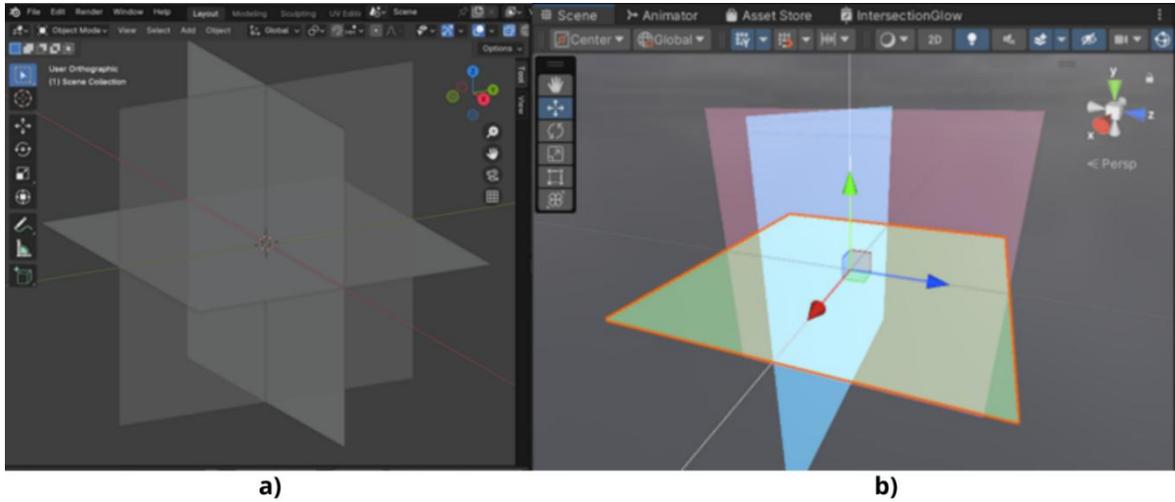


Figura 16. Obtención de los objetos 3D utilizados como planos de referencia, a) generación de los planos en Blender y b) planos importados en Unity modificados con materiales.

6. Resultados

6.1. Botones finales en la interfaz

La mayoría de las interacciones dentro de la UI se gestionan a través de los botones, los cuales ejecutan acciones previamente programadas en scripts que fueron posteriormente asignados a cada componente.

Tabla 1. Funciones de los botones.

Añade una guía		Muestra un menú desplegable de los objetos que se pueden agregar a la escena.
Planos X,Y,Z		Agregan los planos X, Y, Z con diferentes colores, a la escena, las veces que se requieran.
Marca		Agrega una esfera a la escena de color rojo.

Carga un modelo 3D		Despliega un menú que muestra los botones que importan los modelos 3D del ventrículo y cráneo.
Ventrículos y cráneo		Botones que importan los modelos del cráneo y ventrículos, en la posición (0,0,0) de la escena y le agrega un material predeterminado a cada modelo para diferenciar cada modelo.
Menú principal		Dirige al usuario al menú principal de la interfaz.
Flechas para controlar la vista alrededor de los modelos (arriba, abajo, derecha e izquierda)		Permiten controlar la dirección en la que rota la cámara, alrededor del cráneo y ventrículos en la escena de Edición.
Cargar guías		Permite cargar las guías, marcas y planos guardados, de la carpeta de Prefabs en <i>Unity</i> , y se colocan en la posición, rotación y escala correspondiente.
Guardar guías		Guarda la posición, rotación y escala de las guías, marcas y planos en un archivo Json, en una carpeta creada por la interfaz, llamada "Proyecto" ubicada en el escritorio.

Eliminar		Elimina los elementos seleccionados. Las marcas, guías y planos son los únicos elementos que pueden ser seleccionados.
Guía		Agrega un cilindro en la escena, para señalar la trayectoria del catéter.
Modificadores de guías (mover, rotar, escala)		Cambian el modo de edición sobre el objeto (entre mover, rotar y escalar).
Acercar y alejar		Permiten acercar y alejar la cámara de los modelos 3D, del cráneo y ventrículos.
Ayuda		Muestra una descripción amplia de los botones y sugiere los pasos de uso de la interfaz.
Activar cámara		Activa y desactiva la manipulación de la cámara en toda la escena de simulación y navegación.
Desplegar		Despliega un menú de los objetos que se han añadido a la escena, que podrán ser alineados.

<p>Botones de carga y alineación de modelos 3D</p>		<p>Cargan los modelos virtuales al navegador y posteriormente se alinean a los modelos reales.</p>
<p>Panel de carga y alineación</p>		<p>Abre un panel con los botones que cargan y alinean los modelos virtuales a los modelos físicos impresos.</p>
<p>Botones del menú principal</p>		<p>Dirigen al usuario a las escenas correspondientes de editar y simulación. Mientras que el botón de Salir retirará al usuario del modo <i>build</i> de la interfaz, y el botón de Ayuda sugerirá el orden en que se debe acceder a las escenas.</p>

Tabla 1. Botones en la interfaz, los colores representan en que escenas se utilizan, azul: escena de edición, rosa: escena de simulación, verde: escena de edición y simulación, y amarillo: menú principal.

Para mejorar la experiencia del usuario y simplificar el entendimiento de la interfaz, cada botón muestra una breve descripción de la acción que realiza cuando el puntero se posa sobre él (Figura 17).

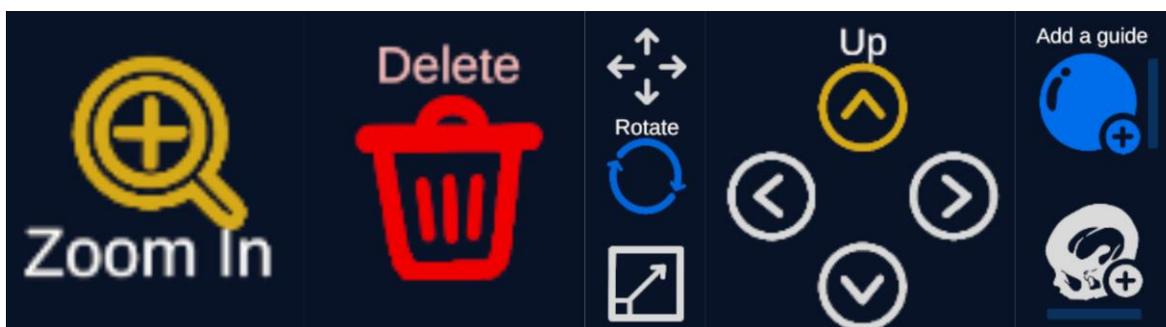


Figura 17. Descripción de cada botón. Se muestran los diferentes textos que aparecen en algunos de los botones que se encuentran en la escena de Edición, cuando el puntero está sobre él.

6.2. Escena de Menú Principal

Esta es la primera escena que el usuario visualiza al ingresar a la interfaz (Figura 18). En ella, puede seleccionar a qué escena desea acceder, dependiendo de si iniciará un nuevo proyecto, continuará con uno previamente guardado o si ya ha finalizado la etapa de edición y desea avanzar directamente a la simulación en realidad aumentada.

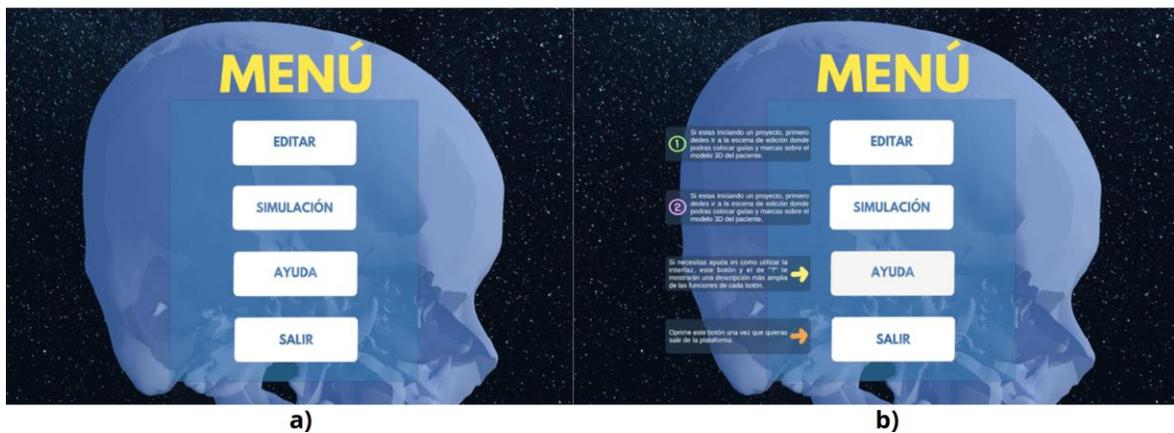


Figura 18. Capturas de pantalla de la UI en donde se muestra el a) menú principal sin seleccionar algún botón y b) el menú principal, una vez que se selecciona la opción de ayuda, mostrando las descripciones detalladas de los botones y sugerencias de uso.

6.3. Escena de Edición

En esta escena se permite realizar la importación de los modelos 3D cráneo y ventrículos, previamente segmentados a partir de estudios clínicos (Figura 19). Una vez cargados, puede realizar la planeación preoperatoria o identificar trayectorias y puntos relevantes para fines educativos, mediante la inserción de elementos como planos de referencia, guías y marcas (Figura 20).

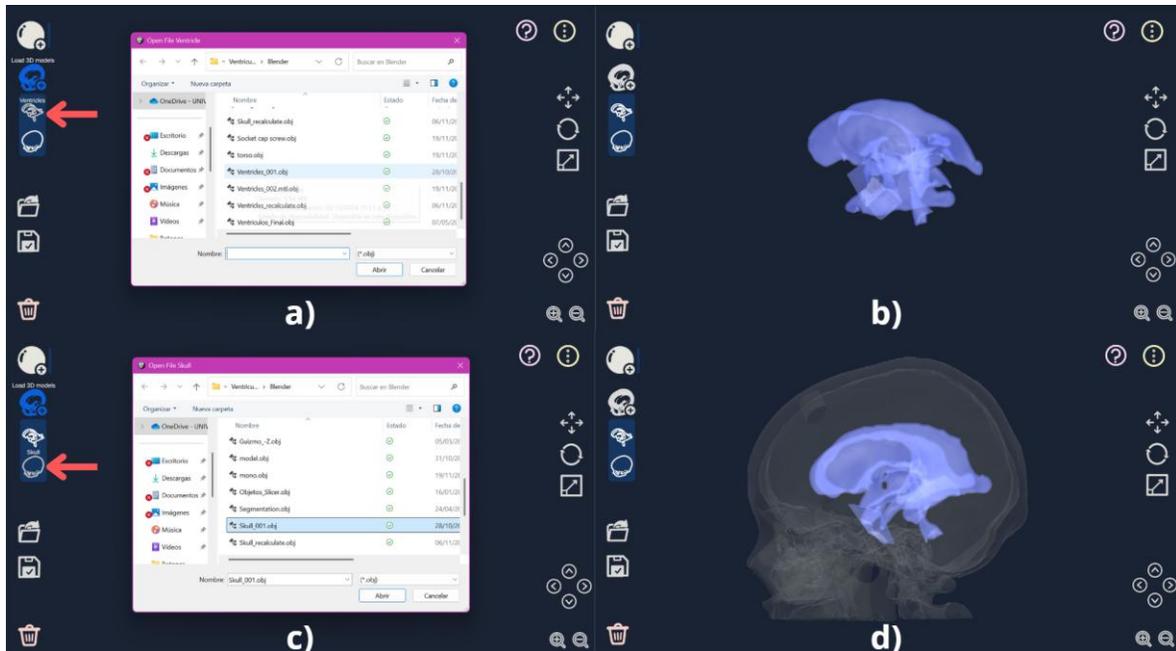


Figura 19. Proceso de importación de los modelos 3D: en a) y c) se muestran las ventanas de búsqueda de archivos y selección de los archivos .obj, b) y d) los modelos 3D ya cargados dentro de la UI, modificados con materiales transparentes ya predeterminados por la interfaz.

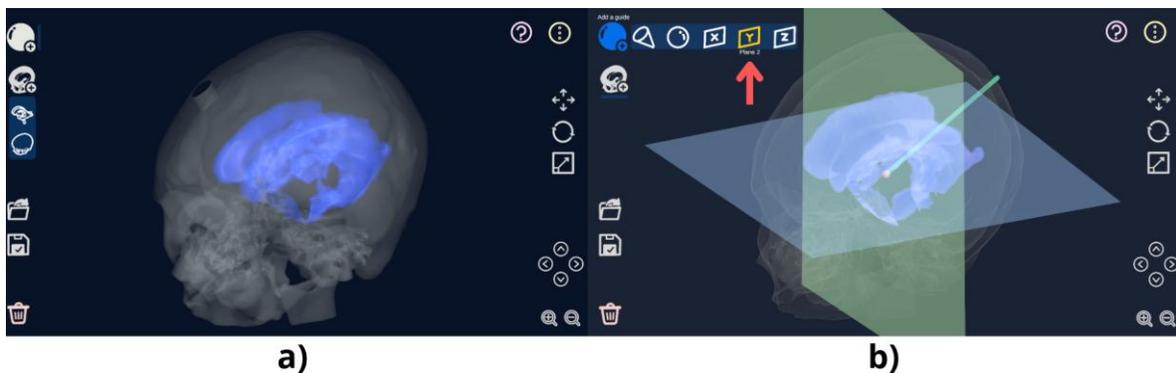


Figura 20. Edición sobre los modelos 3D. a) Modelos 3D importados en la UI y b) despliegue del menú para insertar las guías, marcas y planos deseados.

Durante el procedimiento de edición, se ofrece a los usuarios la opción de activar o desactivar una función de Ayuda, diseñada para ofrecer orientación sobre el funcionamiento de los botones e indicar paso a paso los procedimientos para importar y guardar las modificaciones realizadas (Figura 21).

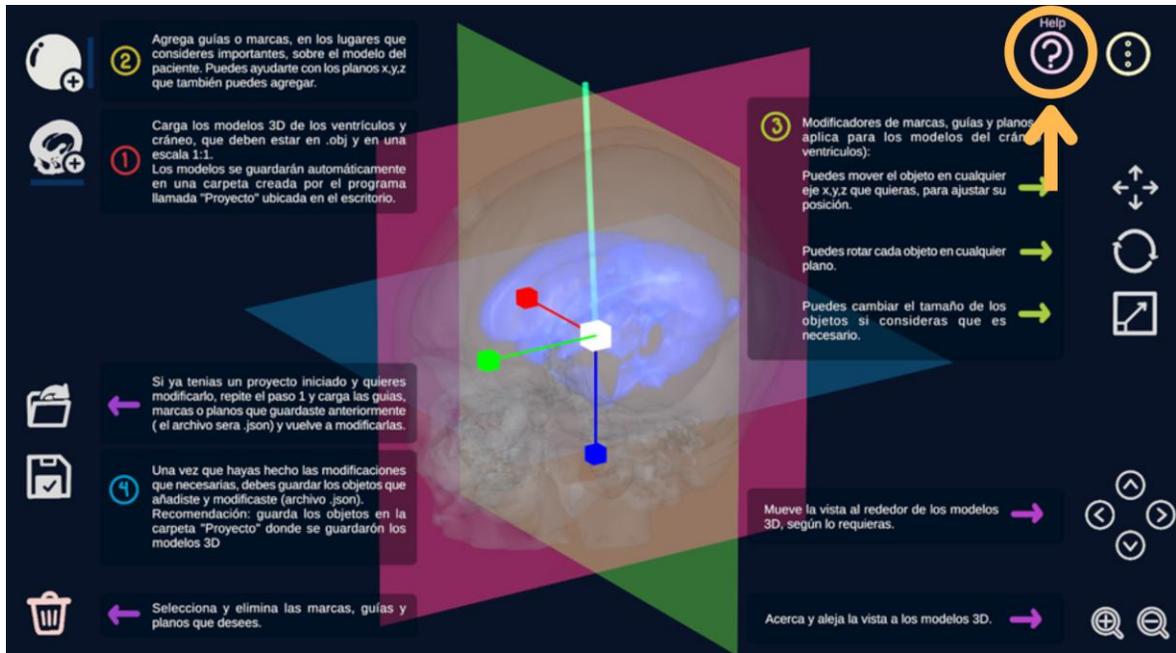


Figura 21. Botón de Ayuda activado durante el proceso de edición. Paneles con descripciones y sugerencias del uso de la interfaz.

El usuario también puede eliminar las guías, marcas y planos añadidos, de acuerdo con sus necesidades. Esta opción solo está disponible en la escena de Edición (Figura 22).

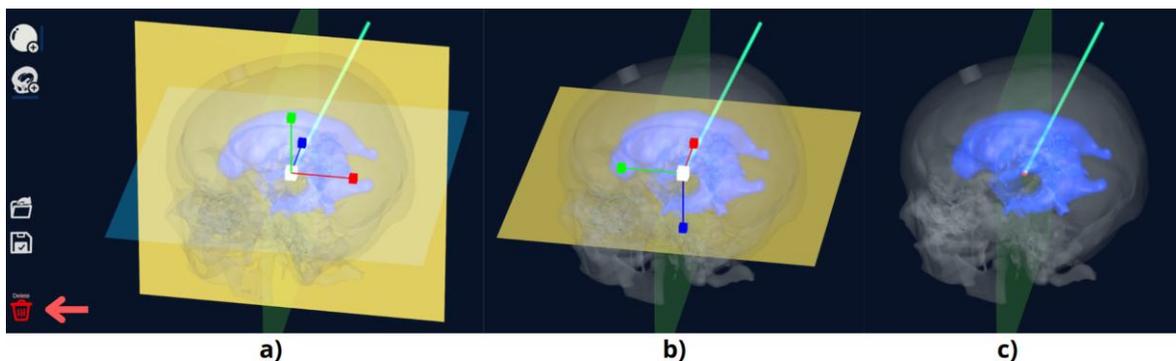


Figura 22. Objetos eliminados en la edición. Como ejemplo se muestra la a) eliminación del plano X y b) el plano Z, c) quedando presentes en la escena el plano Y, una marca y una guía.

La función de edición facilita que el usuario manipule los objetos agregados en la escena mediante las operaciones de traslación, rotación y escalado, ajustándolos libremente según los requerimientos del procedimiento (Figura 23).

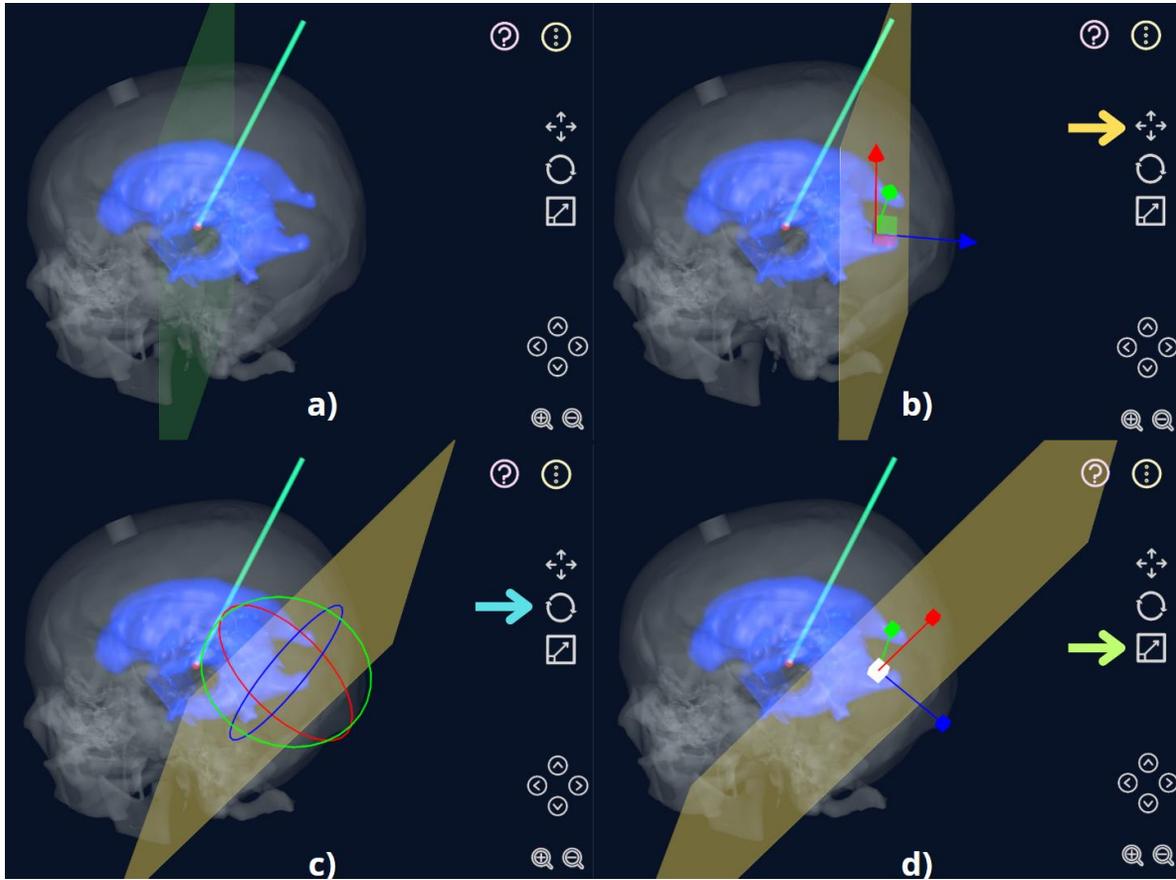


Figura 23. Objetos editados. a) Siguiendo con el ejemplo de la Figura 21, se presenta el uso de las herramientas de b) mover (se selecciona el plano y se desplaza a la derecha), c) rotar (el plano es rotado a la derecha) y d) escalar (se incrementa el tamaño del plano).

Con el fin de facilitar el proceso de edición, la interfaz permite desplazar la vista alrededor, así como acercarse o alejarse respecto a los modelos del cráneo y los ventrículos, proporcionando una visión más clara y precisa durante la colocación de los objetos (Figura 24).

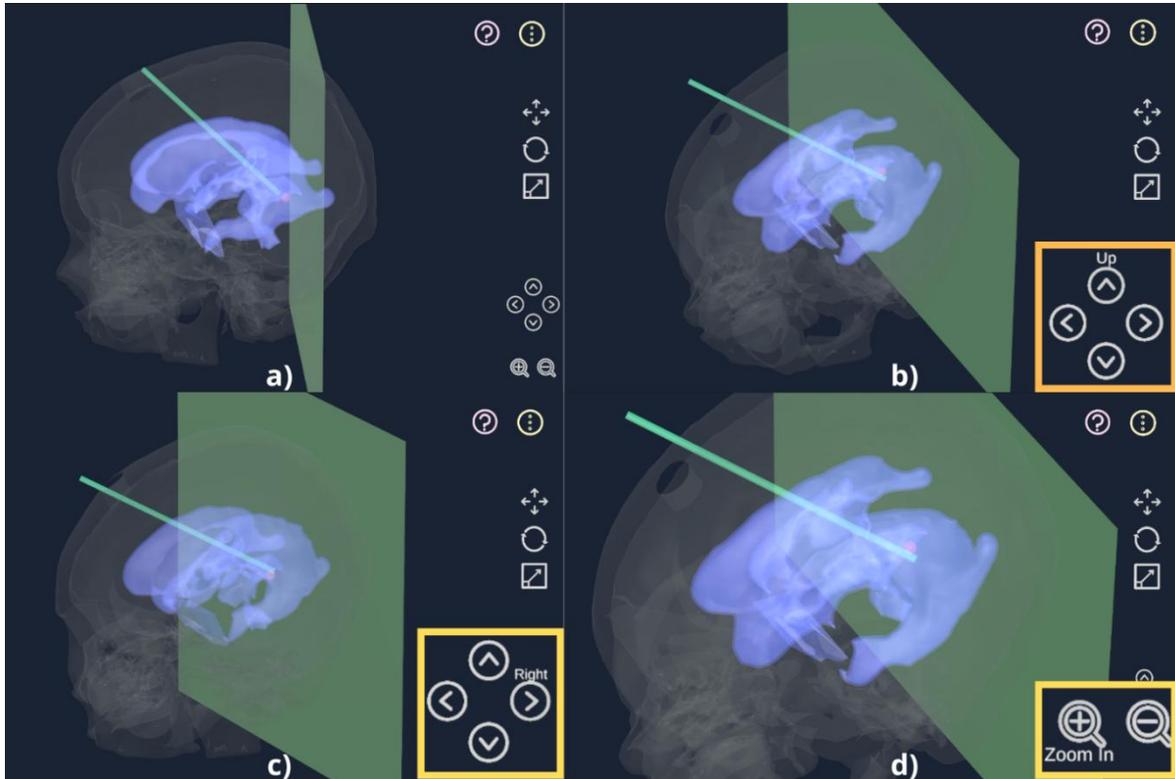


Figura 24. Ajustes en la vista de edición. En la escena a) mientras se están agregando las marcas, guías o planos se manipula la vista, b) rotando la vista sobre el objeto, c) hacia la derecha y por último d) acercando la vista a donde está la marca.

Los modelos anatómicos 3D (cráneo y ventrículos) se almacenan automáticamente en una carpeta denominada “Proyecto”, creada por la interfaz en el escritorio al momento de ser importados. Por otro lado, los objetos agregados durante la edición como guías, planos y marcas deben ser guardados manualmente por el usuario en la ubicación de su elección, preferentemente en la misma carpeta “Proyecto” para mantener una estructura organizada (Figura 25).

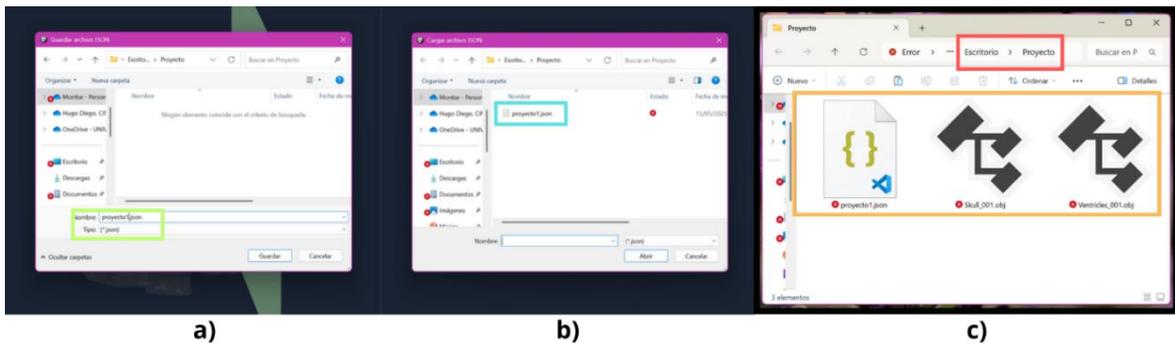


Figura 25. Objetos guardados. Una vez que se termina la edición, a) se hace el guardado de la posición, nombre del objeto, rotación y escala de los objetos agregados en un archivo Json. b) Si ya se había empezado la edición y se requiere hacer una modificación los objetos se cargan nuevamente en la escena con el archivo Json. c) Los modelos anatómicos, marcas, guías o planos se quedarán guardados en la carpeta llamada "Proyecto".

6.4. Escena de Simulación

Una vez finalizada la etapa de edición, los modelos son importados nuevamente en la escena de Simulación, donde se lleva a cabo el registro y alineación entre los modelos virtuales y sus correspondientes físicos.

El modelo de la herramienta (catéter) también es cargado en la escena, y es alineado con su contraparte física mediante los algoritmos del neuronavegador, permitiendo que los movimientos reales se reflejen con precisión en la escena virtual de la interfaz (Figura 26).

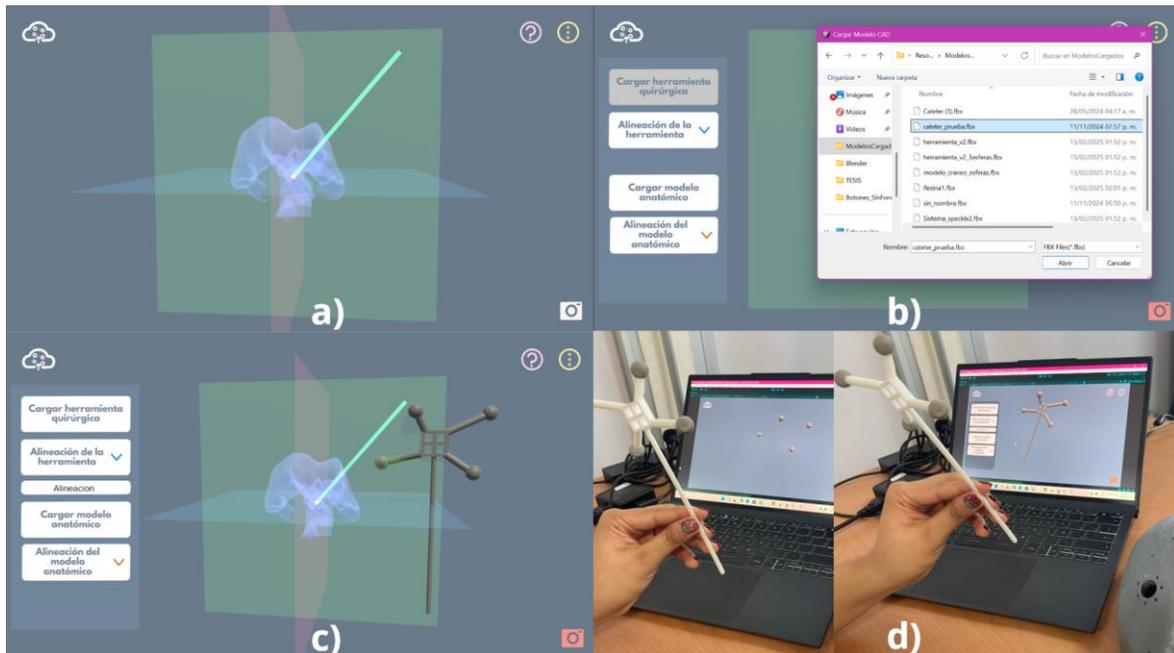


Figura 26. Importe y alineación del catéter en la escena de Simulación. a) Se muestra la escena de Simulación con los objetos insertados en la escena de Edición, b) la selección del botón para cargar la herramienta que abre la ventana de búsqueda, c) la herramienta importada en la escena y d) la selección de Alineación que sincroniza el modelo real con el virtual.

Posteriormente, se importa el modelo 3D del cráneo, al cual se le asignan como objetos dependientes (hijos) las guías, marcas y planos agregados previamente en la escena de Edición. Estos objetos se mantienen activos entre escenas para permitir modificaciones

adicionales durante la sesión. De forma similar al procedimiento con la herramienta quirúrgica, el modelo del cráneo se sincroniza con su modelo físico mediante la correspondencia de puntos definidos sobre el modelo virtual y localizados con el catéter sobre el modelo físico (Figura 27).

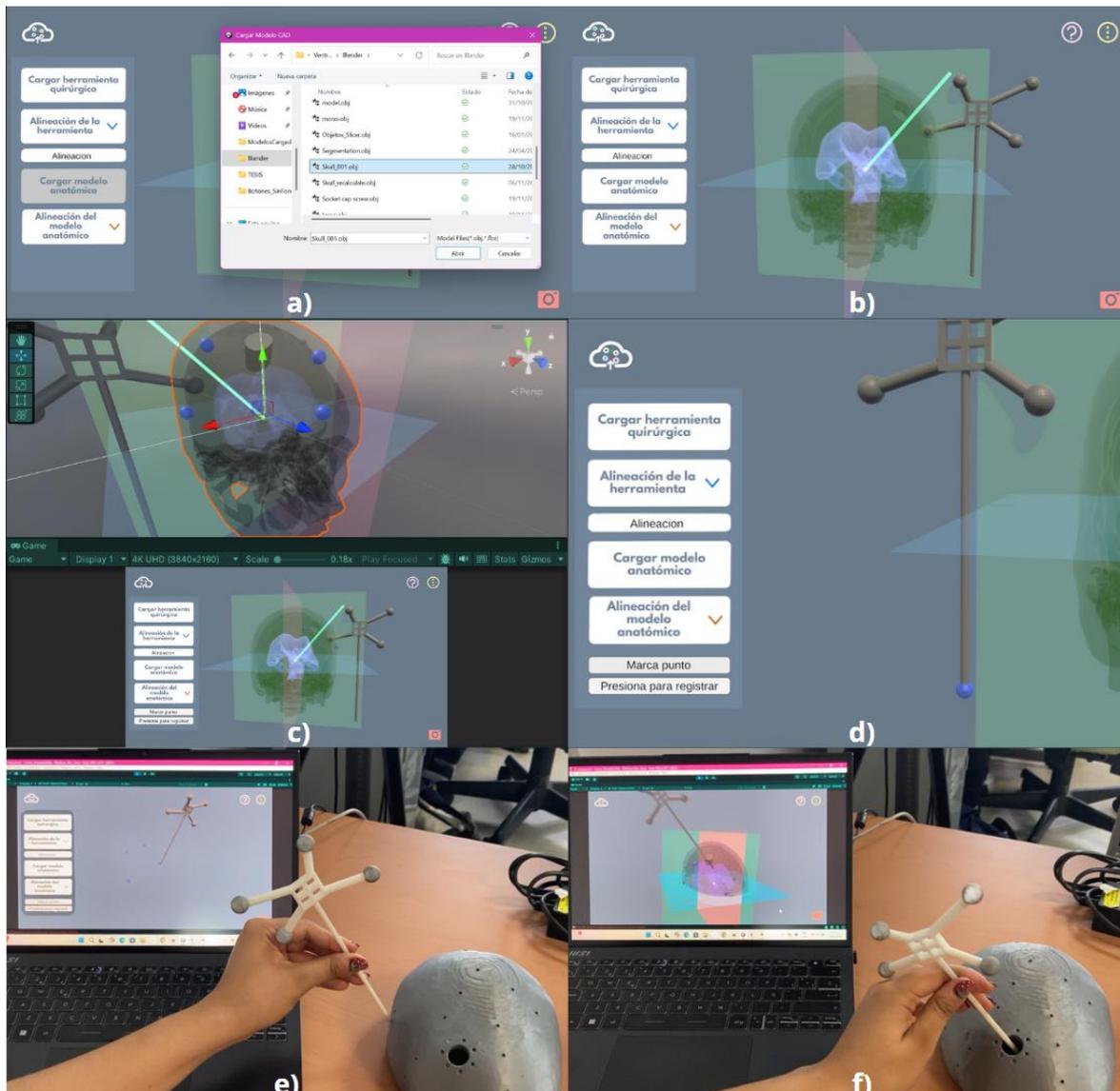


Figura 27. Importe y alineación del cráneo en la escena de Simulación. a) Apertura de la ventana de búsqueda con el botón de carga, b) modelo del cráneo importado en la escena, c) colocación de los puntos de referencia sobre el modelo virtual, d) ejemplo del marcado de puntos con el catéter ya alineado al modelo real, e) localización de los puntos virtuales en el modelo real, y f) funcionamiento completo del simulador con ambos modelos alineados, inserción del catéter en el que coincide en ambos modelos real y virtual.

En la escena de Simulación se incorporó la opción de mostrar u ocultar el panel de botones correspondientes a la carga y la alineación de modelos, optimizando el espacio visual disponible para el usuario. De igual forma, se añadió una opción para activar o desactivar el control de la cámara, la cual puede manipularse mediante el ratón (botón derecho para rotar, presionar la rueda para desplazar y girar la rueda para acercar o alejar).

7. Discusión

El primer prototipo de una interfaz de usuario como complemento del neuronavegador, desarrollado por el Laboratorio de Bioinstrumentación del ICAT, ha sido diseñado con un enfoque centrado en el usuario (DCU), priorizando parámetros de satisfacción, efectividad y eficiencia, como se establece en el artículo de Ramírez-Acosta (2017). Además, busca facilitar su uso por parte de profesionales y residentes de neurocirugía sin experiencia previa en software especializado en navegación.

Los elementos que refuerzan su usabilidad se encuentran en pequeñas acciones programadas, como la visualización de breves textos explicativos al posicionar el puntero sobre los botones, así como la integración de una función de “Ayuda” presente en cada escena. Estas características proporcionan acompañamiento constante al usuario, facilitando la memorización de las funciones y el uso adecuado de la interfaz. El diseño de los botones, simple pero significativo, permite una navegación intuitiva, incluso para usuarios con conocimientos limitados en entornos digitales. Asimismo, el control libre de la vista sobre los modelos 3D aumento de la satisfacción del usuario, ya que responde a las necesidades y habilidades del usuario final.

Además, el sistema permite trabajar con modelos anatómicos provenientes de cualquier caso clínico seleccionado por el usuario, lo cual posibilita la planeación preoperatoria en procedimientos como la ventriculostomía y también promueve la práctica educativa continua, fortaleciendo la efectividad de la herramienta.

La eficiencia de la UI se garantizó mediante el uso de algoritmos sencillos correctamente distribuidos, lo que disminuye tanto el tiempo de ejecución de las funciones como la posibilidad de errores que podrían presentarse.

Comparando con los resultados reportados por Domínguez Velasco et al., (2023) este desarrollo muestra avances en el apoyo visual e interactivo brindado al usuario (Figura 28), permitiendo una mayor familiarización con la interfaz y la personalización de la escena de simulación con realidad virtual y realidad aumentada (Figura 29).

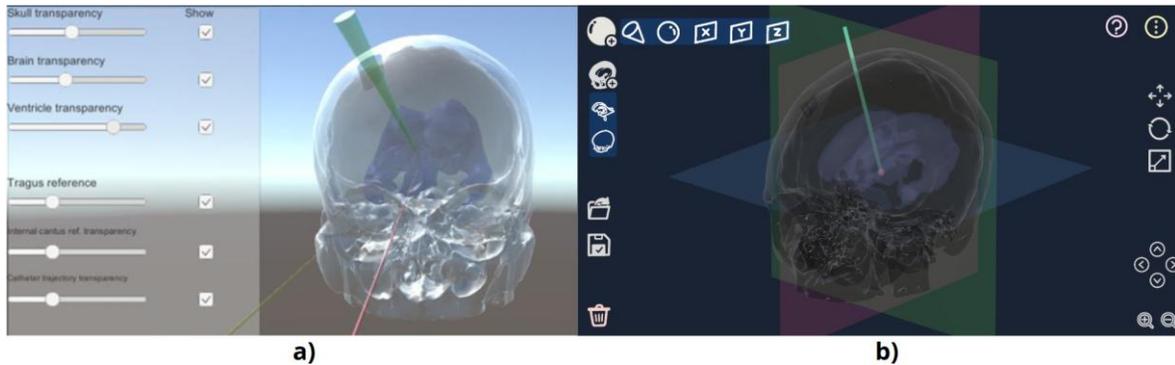


Figura 28. Comparación entre interfaces: a) escena de Edición provisional desarrollada previamente por (Domínguez-Velasco et al., 2023) y b) escena de Edición desarrollada en este proyecto.

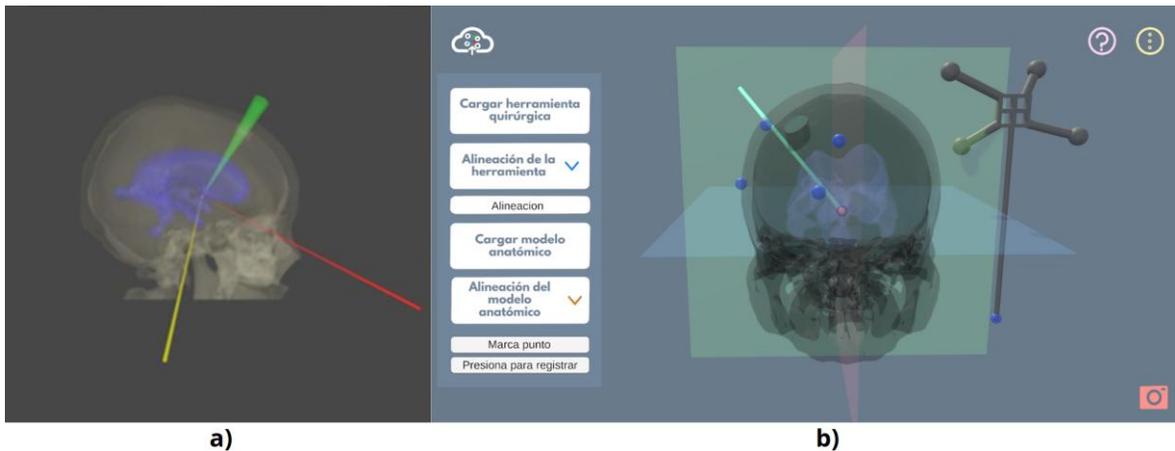


Figura 29. Comparación de entre interfaces: a) escena de Simulación provisional desarrollada previamente por (Domínguez-Velasco et al., 2023) y b) escena de Simulación desarrollada en este proyecto.

Los avances generados en este proyecto podrían contribuir al diseño de nuevas interfaces de usuario para neuronavegadores orientados a la enseñanza y la planificación quirúrgica, especialmente pensadas para usuarios sin conocimientos en software especializado en navegación. Sin embargo, debido a las limitaciones del proyecto, aún es necesario realizar la etapa de evaluación, que permitirá identificar, desde la perspectiva del usuario final, qué funciones y elementos de diseño deben ser ajustados, eliminados o conservados.

Por último, se recomienda repetir el ciclo de DCU las veces que sea necesario para obtener una interfaz que satisfaga de forma adecuada las necesidades de neurocirujanos y residentes.

8. Conclusiones y trabajo a futuro

Se desarrolló una interfaz gráfica de usuario dirigida a expertos y residentes de neurocirugía, enfocada en procedimientos de ventriculostomía, que complementa y amplía las capacidades del sistema neuronavegación por realidad aumentada, desarrollado previamente por el laboratorio de Bioinstrumentación del ICAT. La interfaz permite realizar la planeación preoperatoria de múltiples casos clínicos en un entorno intuitivo mediante funciones que facilitan la colocación de elementos de marcaje para definir el punto de inserción y la trayectoria del catéter de forma precisa. Esto ofrece una herramienta valiosa tanto en el ámbito clínico como educativo, ya que permite simular y estudiar distintas trayectorias de inserción de forma segura y repetible, promoviendo el aprendizaje activo en un entorno controlado y la práctica deliberada.

Para mejorar la experiencia y aumentar el potencial de la interfaz, se propone que en un trabajo a futuro se continúe con la etapa de evaluación bajo la metodología del Diseño Centrado en el Usuario (DCU), para validar la usabilidad de la interfaz con la retroalimentación de los usuarios finales y realizar ajustes según sus necesidades. Asimismo, es conveniente incorporar funciones adicionales que habiliten la personalización de los materiales aplicados en los modelos anatómicos.

Finalmente, aún existen etapas del proceso de alineación entre modelos físicos y virtuales que se ejecutan dentro del entorno de edición de Unity, que deben adaptarse para integrarse completamente al modo de ejecución del navegador, y que otorgue completa autonomía al sistema de neuronavegación.

9. Referencias

3D Slicer image computing platform. (2025). 3D Slicer. <https://slicer.org/>

Albornoz, M. C. (2014, octubre 20). *Diseño de interfaz gráfica de usuario*. XVI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación.

<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/41578>

- Albornoz, M. C., Berón, M., & Montejano, G. A. (2017, septiembre 4). *Interfaz gráfica de usuario: El usuario como protagonista del diseño*. XIX Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2017, ITBA, Buenos Aires).
<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/62078>
- Alizadeh, M., Xiao, Y., & Kersten-Oertel, M. (2024). Virtual and Augmented Reality in Ventriculostomy: A Systematic Review. *World Neurosurgery*, *189*, 90–107.
<https://doi.org/10.1016/j.wneu.2024.05.151>
- Bergström, J., & Hornbæk, K. (2025). DIRA: A model of the user interface. *International Journal of Human-Computer Studies*, *193*, 103381. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2024.103381>
- Bruno, R. R., Wolff, G., Wernly, B., Masyuk, M., Piayda, K., Leaver, S., Erkens, R., Oehler, D., Afzal, S., Heidari, H., Kelm, M., & Jung, C. (2022). Virtual and augmented reality in critical care medicine: The patient's, clinician's, and researcher's perspective. *Critical Care*, *26*, 326. <https://doi.org/10.1186/s13054-022-04202-x>
- Chater, G., Vallejo, S., & Wilches, C. (2010). *Imágenes en Hidrocefalias de Presión Normal*. *17*(4).
https://www.acncx.org/revista/#flipbook-df_829/1/
- Domínguez-Velasco, C. F., Tello-Mata, I. E., Guinto-Nishimura, G., Martínez-Hernández, A., Alcocer-Barradas, V., Pérez-Lomelí, J. S., & Padilla-Castañeda, M. A. (2023). Augmented reality simulation as training model of ventricular puncture: Evidence in the improvement of the quality of punctures. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, *19*(5), e2529. <https://doi.org/10.1002/rcs.2529>
- Fedorov, A., Beichel, R., Kalpathy-Cramer, J., Finet, J., Fillion-Robin, J.-C., Pujol, S., Bauer, C., Jennings, D., Fennessy, F., Sonka, M., Buatti, J., Aylward, S., Miller, J. V., Pieper, S., & Kikinis, R. (2012). 3D Slicer as an Image Computing Platform for the Quantitative Imaging Network. *Magnetic resonance imaging*, *30*(9), 1323–1341.
<https://doi.org/10.1016/j.mri.2012.05.001>
- García, V., & Castillo, G. (2015). *Estrategias y Abordajes en Neurocirugía Craneal*. Almoca.

- Gilard, V., Magne, N., Gerardin, E., Curey, S., Pelletier, V., Hannequin, P., & Derrey, S. (2017). Comparison of electromagnetic neuronavigation system and free-hand method for ventricular catheter placement in internal shunt. *Clinical Neurology and Neurosurgery*, *158*, 93–97. <https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2017.05.007>
- González, C., Vallejo, D., Albusac, J., & Castro, J. (2011). *Realidad Aumentada*. Bibok Publishing S.L. <https://www.librorealidadaumentada.com/>
- Greenberg, M. S. (2013). *Manual de neurocirugía* (2a ed). Journal.
- Grunert, R., Winkler, D., Wach, J., Kropla, F., Scholz, S., Vychopen, M., & Güresir, E. (2024). *IMAGINER: Improving accuracy with a mixed reality navigation system during placement of external ventricular drains. A feasibility study.* <https://doi.org/10.3171/2023.10.FOCUS23554>
- Harrop, J., Lobel, D. A., Bendok, B., Sharan, A., & Rezai, A. R. (2013). Developing a Neurosurgical Simulation-Based Educational Curriculum: An Overview. *Neurosurgery*, *73*(supplement 1), S25–S29. <https://doi.org/10.1227/NEU.0000000000000101>
- Hombeck, J., Voigt, H., & Lawonn, K. (2024). Voice user interfaces for effortless navigation in medical virtual reality environments. *Computers & Graphics*, *124*, 104069. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2024.104069>
- Hsu, H.-H., Chang, C.-Y., Hsu, C.-H., & Xhafa, F. (Eds.). (2017). *Big data analytics for sensor-network collected intelligence*. Academic Press, an imprint of Elsevier.
- Huang, Y., Li, J., Zhang, X., Xie, K., Li, J., Liu, Y., Ng, C. S. H., Chiu, P. W. Y., & Li, Z. (2022). A Surgeon Preference-Guided Autonomous Instrument Tracking Method With a Robotic Flexible Endoscope Based on dVRK Platform. *IEEE Robotics and Automation Letters*, *7*(2), 2250–2257. <https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3143305>
- Kreutzer, J. S., DeLuca, J., & Caplan, B. (Eds.). (2018). *Encyclopedia of Clinical Neuropsychology*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-57111-9>

- La Viola, Jr., J. J., Kruijff, E., McMahan, R. P., Bowman, D., & Poupyrev, I. P. (2017). *3D User Interfaces: Theory and Practice*. Addison-Wesley Professional.
- Lane, J., & Akbari, S. H. A. (2022). Failure of Endoscopic Third Ventriculostomy. *Cureus*, *14*(5), e25136. <https://doi.org/10.7759/cureus.25136>
- Ma, X., Fan, X., Yang, W., Guo, J., Zhou, Z., Wang, D., Wu, Y., Zhang, N., Song, G., Xing, Y., Liu, X., Yu, K., & Yu, H. (2025). Electromagnetic Navigation Improves Accuracy and Reduces Complications of Ventriculoperitoneal Shunts in Patients with Idiopathic Normal Pressure Hydrocephalus: A Single-Center Clinical Experience. *World Neurosurgery*, *194*, 123428. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2024.11.011>
- Mahan, M., Spetzler, R. F., & Nakaji, P. (2013). Electromagnetic stereotactic navigation for external ventricular drain placement in the intensive care unit. *Journal of Clinical Neuroscience*, *20*(12), 1718–1722. <https://doi.org/10.1016/j.jocn.2013.03.005>
- Martínez-Anda, J. J., Muñoz-Romero, I., Pineda-Martínez, D., Avendaño-Pradel, R., Domínguez-Higareda, J., & Vargas, R. A. L. (2016). *Uso de simuladores para entrenamiento en neurocirugía: Cambio en el paradigma de entrenamiento quirúrgico*.
- Moore, A. J., & Newell, D. W. (Eds.). (2005). *Neurosurgery: Principles and Practice*. Springer-Verlag London Ltd. <https://doi.org/10.1007/b137780>
- Muralidharan, R. (2015). External ventricular drains: Management and complications. *Surgical Neurology International*, *6*(Suppl 6), S271–S274. <https://doi.org/10.4103/2152-7806.157620>
- Pelargos, P. E., Nagasawa, D. T., Lagman, C., Tenn, S., Demos, J. V., Lee, S. J., Bui, T. T., Barnette, N. E., Bhatt, N. S., Ung, N., Bari, A., Martin, N. A., & Yang, I. (2017). Utilizing virtual and augmented reality for educational and clinical enhancements in neurosurgery. *Journal of Clinical Neuroscience*, *35*, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.jocn.2016.09.002>
- Raabe, C., Fichtner, J., Beck, J., Gralla, J., & Raabe, A. (2018). *Revisiting the rules for freehand ventriculostomy: A virtual reality analysis*. <https://doi.org/10.3171/2016.11.JNS161765>

- Ramírez-Acosta, K. (2017). Interfaz y experiencia de usuario: Parámetros importantes para un diseño efectivo. *Revista Tecnología en Marcha*, 30, 49–54.
<https://doi.org/10.18845/tm.v30i5.3223>
- Rei, K. M., Ghauri, M. S., Uddin, M. B., & Siddiqi, J. (2024). Ventriculoperitoneal Shunt Failure and Cerebrospinal Fluid Protein: A Meta-Analysis and Systematic Review. *Cureus*, 16(2), e54362. <https://doi.org/10.7759/cureus.54362>
- Sefcik, R. K., Rasouli, J., Bederson, J. B., & Shrivastava, R. K. (2017). Three-dimensional, computer simulated navigation in endoscopic neurosurgery. *Interdisciplinary Neurosurgery*, 8, 17–22. <https://doi.org/10.1016/j.inat.2017.01.003>
- Shurkhay, V. A., Goryaynov, S. A., Aleksandrova, E. V., Spallone, A., & Potapov, A. A. (2016). Navigation systems in neurosurgery. *Zhurnal Voprosy Neurokhirurgii Imeni N. N. Burdenko*, 80(6), 107–114. <https://doi.org/10.17116/neiro2016806107-114>
- Téllez Isla, R., Mosquera Betancourt, G., Téllez Isla, R., & Mosquera Betancourt, G. (2021). Complicaciones de la derivación ventriculoperitoneal en pacientes pediátricos. Revisión del tema. *Gaceta Médica Espirituana*, 23(2), 123–139.
- Yadav, Y. R., Bajaj, J., Ratre, S., Yadav, N., Parihar, V., Swamy, N., Kumar, A., Hedao, K., & Sinha, M. (2021). Endoscopic Third Ventriculostomy—A Review. *Neurology India*, 69(Suppl 2), S502. <https://doi.org/10.4103/0028-3886.332253>
- Yadav, Y. R., Parihar, V., Pande, S., Namdev, H., & Agarwal, M. (2012). Endoscopic third ventriculostomy. *Journal of Neurosciences in Rural Practice*, 3(2), 163–173.
<https://doi.org/10.4103/0976-3147.98222>
- Zhou, Z., Yang, Z., Jiang, S., Zhu, T., Ma, S., Li, Y., & Zhuo, J. (2023). Design and validation of a navigation system of multimodal medical images for neurosurgery based on mixed reality. *Visual Informatics*, 7(2), 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.visinf.2023.05.003>