



**UNIVERSIDAD  
MODELO**

## **Simulador de Colonoscopia de Media Fidelidad con Retroalimentación para Entrenamiento Médico**

### **Integrantes:**

Christian Andrey Durán Zúñiga

Luis Andrés Granados Escoto

Nina Rabelo Priego

Ángel Maximiliano Vela Haas

Juan José Zaldívar Rosado

**Carrera:** Ingeniería Biomédica

**Semestre:** Segundo

**Materia:** Proyectos II

**Profesora:** Cielo Guadalupe Poot Bote

**Fecha:** Mayo de 2025

# INTRODUCCIÓN

La simulación médica se ha convertido en una herramienta clave para la formación de profesionales de la salud, ya que permite practicar procedimientos clínicos de manera segura, ética y efectiva. A través de entornos controlados y reproducibles, los estudiantes y médicos en formación pueden adquirir experiencia práctica sin poner en riesgo la seguridad de los pacientes. Esta metodología fomenta la repetición, el aprendizaje por error y el desarrollo de habilidades técnicas y no técnicas, como la toma de decisiones, la comunicación y el trabajo en equipo.

En este contexto, los simuladores de colonoscopia desempeñan un papel crucial al ofrecer una plataforma especializada para entrenar habilidades relacionadas con el examen del tracto gastrointestinal inferior. La colonoscopia es un procedimiento diagnóstico y terapéutico esencial en la medicina moderna, utilizado ampliamente para la detección precoz de enfermedades como el cáncer colorrectal, así como para la identificación y tratamiento de pólipos, hemorragias u otras afecciones intestinales. Sin embargo, dominar esta técnica requiere una coordinación precisa, conocimiento anatómico detallado y experiencia práctica que muchas veces no puede adquirirse únicamente a través del contacto clínico directo, especialmente en etapas tempranas de la formación médica.

A pesar de su utilidad, muchos de los simuladores disponibles en el mercado presentan costos elevados, lo que limita su adopción en instituciones con recursos reducidos. Además, algunos modelos carecen de características realistas en cuanto a retroalimentación sensorial, visual o táctil, lo que dificulta una experiencia de aprendizaje inmersiva y completa.

En 2024, un estudio realizado en el Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) concluyó que los médicos que practicaron colonoscopias con ayuda de un simulador lograron reducir significativamente el tiempo de realización del procedimiento, lo cual se traduce en mayor eficiencia, menor riesgo de complicaciones y una mejor atención para los pacientes. Esta evidencia subraya la necesidad de desarrollar soluciones accesibles y que fortalezcan la enseñanza clínica en este campo. (Salva Barriga, 2024)

## ANTECEDENTES

La colonoscopía es un procedimiento médico esencial para la detección y tratamiento oportuno de enfermedades del tracto digestivo inferior, principalmente el colon y el recto. A través del uso de un colonoscopio —un tubo delgado y flexible con una cámara en su extremo— los médicos pueden visualizar directamente el interior del intestino grueso, permitiendo identificar lesiones, pólipos, inflamaciones, sangrados y otras anomalías que pueden ser indicio de enfermedades como el cáncer colorrectal, la colitis ulcerosa o la enfermedad de Crohn.

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, el cáncer colorrectal es la tercera causa más común de cáncer a nivel mundial y representa una de las principales causas de muerte relacionada con enfermedades oncológicas. En México, datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) reportan que el cáncer colorrectal se encuentra entre las primeras 10 causas de muerte por cáncer. Esta estadística pone de manifiesto la urgente necesidad de mejorar la detección temprana, para lo cual una colonoscopía bien realizada resulta indispensable.

Sin embargo, realizar una colonoscopía requiere un nivel técnico elevado y experiencia significativa. La maniobra del colonoscopio implica el dominio de habilidades como la navegación por curvas anatómicas complejas, el reconocimiento visual de estructuras patológicas y el control del equipo con precisión. Tradicionalmente, el entrenamiento se realizaba directamente con pacientes, lo cual implicaba múltiples desafíos éticos, clínicos y logísticos: riesgos de error, incomodidad del paciente, mayor duración del procedimiento, y una mayor probabilidad de complicaciones.

En respuesta a estos retos, han surgido alternativas de simulación médica que buscan brindar a los médicos en formación un entorno controlado, seguro y repetible para desarrollar estas competencias. Los simuladores de colonoscopía actualmente disponibles se dividen en tres categorías principales:

- Simuladores de baja fidelidad: Generalmente hechos con materiales básicos como goma, látex o PVC, permiten practicar habilidades motoras básicas, pero carecen de realismo sensorial y no ofrecen retroalimentación cuantitativa.

- Simuladores de alta fidelidad: Utilizan realidad virtual, sensores hápticos y software especializado. Empresas como CAE Healthcare, Kyoto Kagaku, Simbionix (ahora parte de 3D Systems) y GI Mentor™ han liderado el mercado con equipos avanzados. Aunque su nivel de realismo es alto y han demostrado mejorar las competencias clínicas, su costo puede superar los \$70,000 USD, excluyendo costos de mantenimiento y capacitación técnica.
- Simuladores intermedios o híbridos: Algunos estudios recientes han explorado modelos más accesibles que combinan piezas físicas impresas en 3D con retroalimentación básica mediante sensores o interfaces digitales. Ejemplos incluyen el Walmsley Endoscopy Training Box, así como proyectos académicos en países como India o Brasil, donde se han diseñado simuladores de bajo costo con resultados prometedores en aprendizaje.

Frente a esta variedad, el diferenciador clave de cada propuesta radica en el balance entre realismo, costo y accesibilidad. Mientras los simuladores de alta gama ofrecen una experiencia inmersiva completa, su adquisición suele ser inviable para instituciones en países en desarrollo. Los modelos de bajo costo, por otro lado, tienden a ser limitados en funcionalidad. Por ello, existe un vacío de innovación en soluciones accesibles y efectivas que integren elementos tecnológicos para mejorar la retroalimentación sin depender de infraestructura costosa.

Entre las alternativas complementarias al uso de simuladores destacan también las prácticas con modelos animales (poco éticos y costosos), el uso de videos endoscópicos para análisis visual, y las simulaciones en software exclusivamente (sin interacción física), cada una con sus propias limitaciones.

El creciente interés por integrar la simulación en programas de residencia médica responde tanto a exigencias éticas como a resultados concretos. Como lo reporta Salva Barriga (2024), en un estudio realizado en el IMSS, los médicos residentes que fueron entrenados con simuladores mostraron una reducción significativa en el tiempo de realización de pruebas endoscópicas, lo que implica mayor eficiencia y menor riesgo clínico. Este tipo de evidencia fortalece la necesidad de seguir investigando y desarrollando simuladores accesibles que puedan implementarse ampliamente en el sistema de salud y en las instituciones educativas.

# OBJETIVOS

## **Objetivo general**

Diseñar un simulador funcional de media fidelidad para la práctica de colonoscopias con retroalimentación, enfocado en estudiantes del sector salud.

## **Objetivos específicos**

- Desarrollar un software de simulación en C# que proporcione retroalimentación vinculado a una base de datos en MySQL para almacenar resultados de las simulaciones
- Diseño del modelo físico de un intestino grueso con las secciones correspondientes definidas con fidelidad anatómica impreso 3D con TPU
- Integrar fotosensores en el prototipo físico para mejorar la precisión y respuesta del simulador al tener la ubicación de la sonda con iluminación

# RESULTADOS



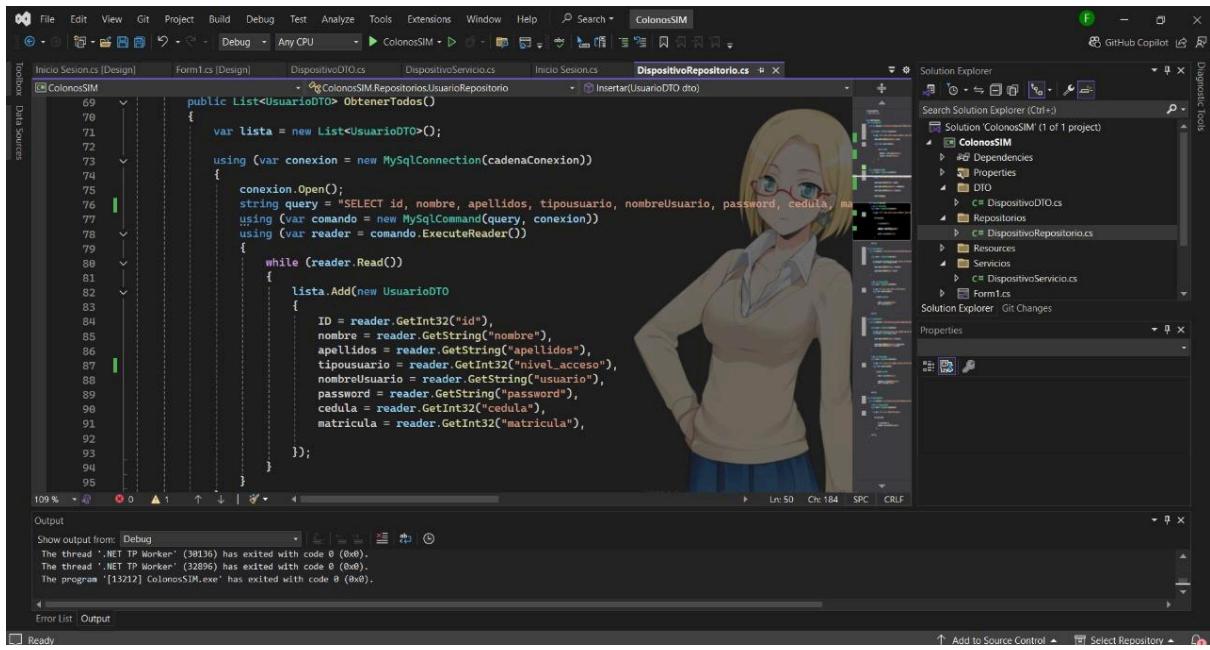
Imagen 1. Interfaz de la aplicación Colono-SIM

La interfaz de la aplicación fue hecha en Microsoft Visual Studio, está unida a una base de datos en donde puedes hacer tu cuenta como maestro y como alumno



Imagen 2. Inicio de sesión

Después de hacer click en el botón de iniciar sesión, se abrirá esta ventana, en donde puedes iniciar sesión para acceder a la simulación



The screenshot shows the Microsoft Visual Studio IDE interface. The main window displays a C# code editor with the file 'DispositivoRepository.cs' open. The code is for a MySQL database connection and user retrieval. The Solution Explorer on the right shows the project structure for 'ColonoSIM' with files like 'DispositivoDTO.cs', 'DispositivoServicio.cs', and 'Form1.cs'. The Properties and Solution Explorer tabs are also visible. A cartoon character of a woman with blonde hair and glasses is displayed in the center of the IDE window. The Output window at the bottom shows the program has exited with code 0.

```
69 public List<UsuarioDTO> ObtenerTodos()
70 {
71     var lista = new List<UsuarioDTO>();
72
73     using (var conexion = new MySqlConnection(cadenaConexion))
74     {
75         conexion.Open();
76         string query = "SELECT id, nombre, apellidos, tipousuario, nombreUsuario, password, cedula, matricula FROM usuarios";
77         using (var comando = new MySqlCommand(query, conexion))
78         using (var reader = comando.ExecuteReader())
79         {
80             while (reader.Read())
81             {
82                 lista.Add(new UsuarioDTO()
83                 {
84                     ID = reader.GetInt32("id"),
85                     nombre = reader.GetString("nombre"),
86                     apellidos = reader.GetString("apellidos"),
87                     tipousuario = reader.GetInt32("nivel_acceso"),
88                     nombreUsuario = reader.GetString("usuario"),
89                     password = reader.GetString("password"),
90                     cedula = reader.GetInt32("cedula"),
91                     matricula = reader.GetInt32("matricula"),
92                 });
93             }
94         }
95     }
96 }
```

Imagen 3. Código de la base de datos

Esta es una pequeña parte del código para unir la base de datos de MySQL a Microsoft Visual Studio

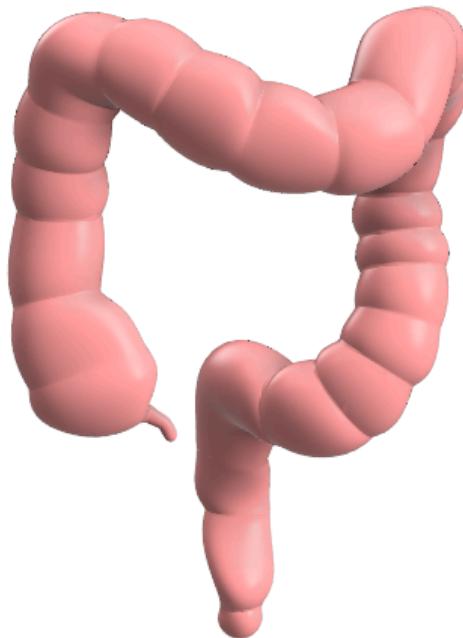
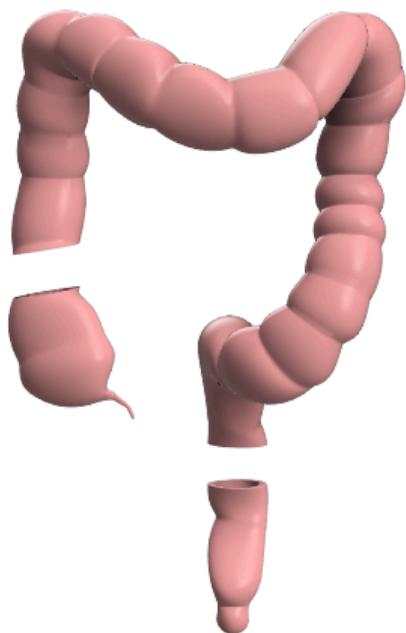


Imagen 4. Diseño final del intestino

El intestino se diseñó en Fusion 360 a partir de las imágenes de un atlas anatómico, el tiempo de diseño fue de aproximadamente 2 semanas.



*Imagen 5. Intestino seccionado*

*El intestino fue seccionado para su impresión en TPU y para posteriormente, colocarle silicona, de manera que tuviera una textura aproximada a un intestino real.*



*Imagen 6. Resultado del intestino*

*Así es como se ve una parte del intestino impreso en TPU. Fue partido a la mitad para poder agregar la silicona*



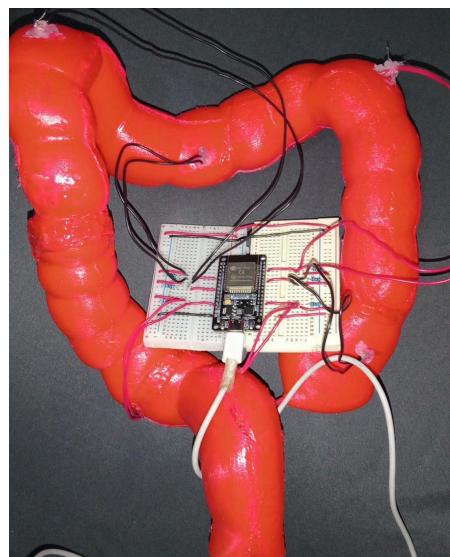
*Imagen 7. Vista del interior del intestino*

*Después de aplicarle silicona al interior del intestino, se ve ligeramente más realista por dentro.*



*Imagen 8. Sensor fotoresistor usado*

*Este es el tipo de sensores usados en el simulador de colonoscopia*



*Imagen 9. Sensores incorporados en el simulador*

*Este es el simulador con los 6 sensores incorporados.*

# DISCUSIÓN

Desde la etapa de diseño, se emplearon herramientas CAD como Fusion 360 para generar modelos anatómicos impresos en 3D. A diferencia de enfoques previos, como el propuesto en el artículo "Physical Simulator for Colonoscopy: A Modular Design Approach and Validation" (IEEE, 2023), donde se utilizan moldes llenos de silicona, en este proyecto se optó por imprimir el intestino por secciones usando TPU y recubrirlo internamente con silicona. Esta decisión, priorizó la fidelidad estética, una elección alineada con el enfoque de simuladores híbridos de bajo costo promovido en países en vías de desarrollo. Esto dio como resultado una imagen fidedigna a la encontrada en procedimientos de colonoscopia, con una vista serosa y rosácea del interior del tracto del colon gracias a los materiales utilizados.

Durante el proceso se evaluaron distintos materiales como látex y silicona, considerando propiedades como flexibilidad, resistencia y realismo táctil. Estas pruebas no solo aportaron al diseño del simulador, sino que también permitieron comprender los límites y ventajas de materiales alternativos, respondiendo a la necesidad de soluciones accesibles sin comprometer la funcionalidad.

En cuanto a la dimensión electrónica, se enfrentaron desafíos importantes al integrar sensores PIR con el microcontrolador ESP32, optando finalmente por el uso de fotoresistencias para la detección de un aumento de luz. Al inicio del proyecto, se deseaba que la sonda fuera detectada de forma altamente sensible incorporando un circuito abierto, que al tocar con la cámara, este se cerrara y mandara una señal al software para evaluar en todo momento la posición de la sonda, sin embargo, este método de visualización necesita más recursos y conocimiento, por lo que se decidió usar sensores PIR para mayor facilidad, sobre todo en su comunicación con el software desarrollado en C# en el programa Visual Studio. Al momento de realizarse las pruebas, se comprobó que la cámara de la sonda no era detectada por los sensores, haciendo que el equipo se decantara finalmente por el uso de fotoresistencias. Estas reconocen la luz de la cámara conforme se da su avance en el tracto del colon, siendo posicionándose en puntos específicos del prototipo para detectar con mayor precisión la entrada de luz en el mismo, como en los ángulos esplénico y hepático del colon, por mencionar algunos de ellos. Es importante añadir que se logró establecer conectividad Bluetooth con teléfonos móviles, lo que abre la posibilidad de extender el simulador a

formatos más portátiles y escalables, como lo sugieren las tendencias en telemedicina y educación digital (Tsai et al., 2020).

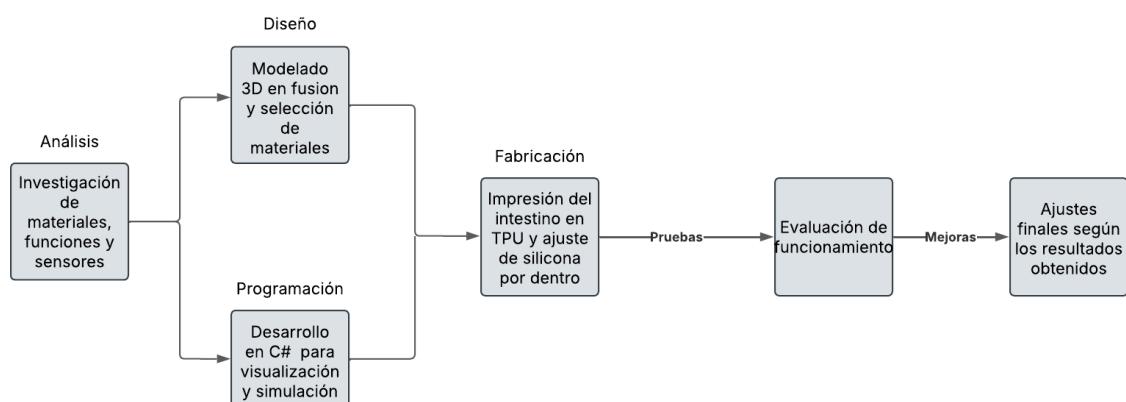
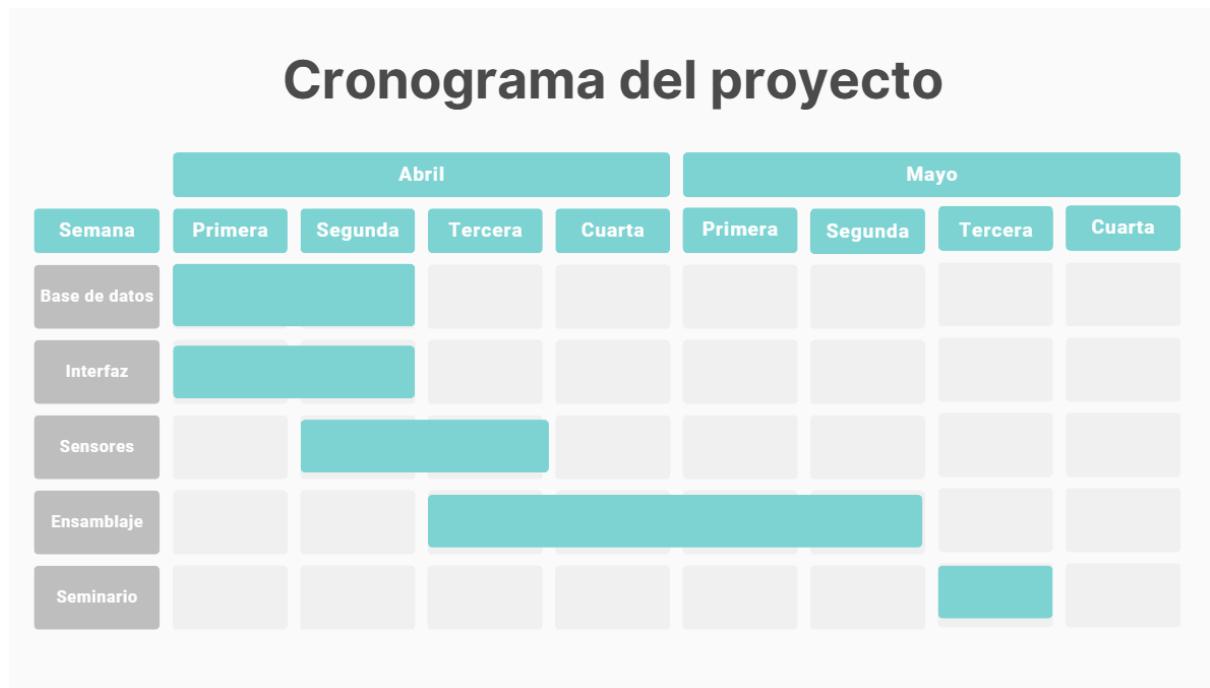
El software Colonos-SIM, aunque aún en una fase inicial, constituye un paso relevante hacia la digitalización de la retroalimentación en simulación. Sus funcionalidades actuales como cronómetro, detección de posición, simulación de cámara endoscópica y base de datos de usuarios se alinean con los requerimientos que demuestran cómo la retroalimentación digital mejora significativamente las habilidades clínicas durante la formación (Aggarwal & Darzi, 2011).

Un aprendizaje clave del proyecto fue la capacidad de adaptación frente a recursos limitados. Decisiones como el uso de sensores económicos pero funcionales y la elección de materiales disponibles localmente reflejan un enfoque de ingeniería biomédica orientado a la eficiencia sin sacrificar calidad (Enderle et al., 2005). Este principio se vuelve aún más relevante ante la brecha existente entre simuladores de alta gama y la realidad de muchas instituciones educativas en países en desarrollo.

Finalmente, el trabajo colaborativo fue esencial para el éxito del proyecto. Es necesario mencionar los retrasos intermitentes en el proceso de impresión, pero he de hacerse mención de la capacidad de adaptación de los integrantes del equipo. La especialización por áreas de modelado, programación, ensamblaje y electrónica permitió un avance más organizado, pero el hecho de contar con habilidades individuales que permitieran el desarrollo de múltiples tareas en diferentes áreas de especialización, ayudó enormemente la finalización del prototipo. Se puede exigir en futuros proyectos que exista una constante retroalimentación entre los integrantes con el propósito de fomentar la resolución efectiva de problemas, pues los plazos no eran completados con facilidad por eventualidades.

Esta dinámica mostró el avance y el esfuerzo tanto individual como colaborativo de la búsqueda de emular los procesos multidisciplinarios que se experimentan en el desarrollo de dispositivos médicos reales, dando una perspectiva aterrizada al contexto estudiantil que afronta el equipo en este proyecto, se espera una mejora continua de cada integrante con el desarrollo de cada área de oportunidad analizada durante el proceso de desarrollo del simulador de colonoscopia.

# CRONOGRAMA



Nombre del integrante	Actividades específicas
Christian Andrey Durán Zúñiga	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño del intestino en Fusion 360 (febrero a marzo)</li> <li>• Construcción / armado (Mayo)</li> <li>• Apoyo en documentos y presentación (Mayo)</li> </ul>
Luis Andrés Granados Escoto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño y programación de la interfaz (Marzo)</li> <li>• Programación de los sensores en el ESP32. (Mayo)</li> <li>• Construcción / armado (Mayo)</li> </ul>
Nina Rabelo Priego	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investigación y documentos/presentación</li> <li>• Construcción / armado (Mayo)</li> <li>• Elaboración de caja para el intestino (Junio)</li> </ul>
Ángel Maximiliano Vela Haas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Impresión de los moldes e intestinos (febrero y abril)</li> <li>• Programación de base de datos</li> </ul>
Juan José Zaldívar Rosado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investigación y documentos/presentación</li> <li>• Construcción / armado (Mayo)</li> <li>• Elaboración de caja para el intestino (Junio)</li> </ul>

# REFERENCIAS

Lateef, F. (2010). Simulation-based learning: Just like the real thing. *Journal of Emergencies, Trauma and Shock*, 3(4), 348–352. <https://doi.org/10.4103/0974-2700.70743>

Issenberg, S. B., McGaghie, W. C., Petrusa, E. R., Gordon, D. L., & Scalese, R. J. (2005). Features and uses of high-fidelity medical simulations that lead to effective learning: a BEME systematic review. *Medical Teacher*, 27(1), 10–28.

Maran, N. J., & Glavin, R. J. (2003). Low- to high-fidelity simulation – a continuum of medical education?. *Medical Education*, 37, 22–28.

Expressif Systems. (2022). ESP32 Technical Reference Manual.

Finocchiaro, M., Zabban, C., Huan, Y., Mazzotta, A. D., Schostek, S., Casals, A., Hernansanz, A., Menciassi, A., Arezzo, A., & Ciuti, G. (2023). Physical Simulator for Colonoscopy: A Modular Design Approach and Validation. *IEEE Access*, 11, 36945–36960. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3266087>