

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería

Número Especial, 50 Aniversario UAM

ISSN: 2683-2607

No. 140



**Responsabilidad compartida
entre Ciencia y Bioética en la
experimentación con animales**

**Reparación de la médula espinal:
problemática y estrategias**

**La Importancia de la Imagenología
por Resonancia Magnética
en la Última Década**





Contenido

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería

Número Especial, 50 Aniversario UAM, 2024, No. 140

Editorial	3	<i>Técnicas para la evaluación y la remediación de los efectos de la privación de sueño empleando resonancia magnética funcional estimulación magnética transcranial</i>	50
<i>Responsabilidad compartida entre Ciencia y Bioética en la experimentación con animales</i>	5	Diana Martínez Cancino Joaquin Azpiroz Leehan	
Yessica Heras Romero Axayácatl Morales Guadarrama Elizabeth Téllez Ballesteros		<i>La Importancia de la Imagenología por Resonancia Magnética en la Última Década</i>	57
<i>Concentradores de Oxígeno para uso médico</i>	15	Lara-Estrada Rafael Morales Guadarrama Axayacatl	
Fernando Prieto y Hernández		<i>Como cada mañana</i>	63
<i>Reparación de la médula espinal: problemática y estrategias</i>	28	Luis Quiñones Hernández	
Diana María Osorio Londoño Axayácatl Morales Guadarrama Yessica Heras Romero Juan Morales Corona Roberto Olayo González		<i>Impresión 3D de imágenes médicas: un ejemplo de aplicación en docencia</i>	71
<i>Healthcare 5.0: Oportunidades para la Ingeniería Clínica</i>	37	Cano Papadakis Gabriela Mera Espinoza Betzabet del Carmen Rebolledo Bustillo María de Jesús Rodríguez Jiménez Pedro Misael Cruz Morales Abigail Lorenzo Vázquez Ilse Yareni	
Fabiola M. Martínez Licona		<i>Análisis numérico de una estructura de hueso trabecular bioinspirado</i>	81
<i>Mindray— Un servicio más cercano y una mejor atención médica para todos</i>	42	Tomas De la Mora Ramirez Axayacatl Morales Gudarrama Christopher René Torres SanMiguel	
Fernando Liu Jillian Li			



Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería
en la WEB

Lea los artículos publicados en
<https://contactos.izt.uam.mx>



Casa abierta al tiempo
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA



ÍNDICE DE REVISTAS MEXICANAS
DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Rector General

Dr. José Antonio de los Reyes Heredia

Secretaria General

Dra. Norma Rondero López

UNIDAD IZTAPALAPA

Rectora

Dra. Verónica Medina Bañuelos

Secretario

Dr. Javier Rodríguez Lagunas

Director de la División de Ciencias

Básicas e Ingeniería

Dr. Román Linares Romero

Director de la División de Ciencias

Biológicas y de la Salud

Dr. José Luis Gómez Olivares

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería:

Consejo Editorial:

Dra. Verónica Medina Bañuelos

Dr. Javier Rodríguez Lagunas

Dr. Román Linares Romero

Dr. José Luis Gómez Olivares

UAM- Iztapalapa

Editora en Jefe:

M. C. Alma Edith Martínez Licon

Asistente Editorial:

Lic. Paula López Andrés

Comité Editorial por CBS:

Dra. Edith Arenas Ríos, Dra. Laura Jose-

fina Pérez Flores, Dr. Pedro Luis Valverde

Padilla

Por CBI:

Dr. Hugo Ávila Paredes

Por la Universidad Iberoamericana:

Mtro. Adolfo G. Fink Pastrana

CONTACTOS, REVISTA DE EDUCACIÓN EN CIENCIAS E INGENIERÍA.

3ª Época, No. 140, Número Especial, 50 Aniversario de la Universidad Autónoma Metropolitana a través de la Unidad Iztapalapa, División de Ciencias Básicas e Ingeniería y División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Prolongación Canal de Miramontes 3855, Col. Ex-Hacienda San Juan de Dios, Alcaldía Tlalpan, C.P. 14387, México, Ciudad de México y Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186, Col. Leyes de Reforma 1a Sección, Iztapalapa, Cd. de México. C.P. 09310, Edificio T144, Tel. 5804 – 4600. Ext. 1144. Página electrónica de la revista: <https://contactos.izt.uam.mx/> y dirección electrónica: cts@xanum.uam.mx Editora responsable MC Alma E. Martínez Licon. Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo de Título No. 04-2023-061914482700-102, ISSN 2683-2607, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Mtra. Alma E. Martínez Licon; Unidad Iztapalapa, División de CBI y CBS; fecha de última modificación 31 de marzo de 2025. Tamaño del archivo 17.1 MB.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Universidad Autónoma Metropolitana.

Fecha de Publicación: Marzo de 2025.

Los artículos publicados en **Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería** son sometidos a arbitraje; para ello se requiere enviar

el trabajo en Word a <https://contactos.izt.uam.mx/>

Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería,

UAM – Iztapalapa, T144, Tel. 5804-4600. Ext. 1144

Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186. C.P. 09310

e-mail cts@xanum.uam.mx

Editorial

Nos complace a todos los miembros del Centro Nacional de Investigación en Imagenología e Instrumentación Médica (CI3M) presentarles este volumen de la revista ContactoS que recopila una serie de trabajos de diversos tipos para que la comunidad de la UAM-Iztapalapa y el público en general pueda conocer el tipo de actividades que desarrollamos.

Presentamos un trabajo sobre Bioética, escrito por la Dra. Yessica Heras, nuestra coordinadora del comité de ética del laboratorio; Un trabajo acerca de un concentrador de oxígeno de alto flujo y alta concentración que el Dr. Fernando Prieto, gran amigo y ex profesor de Ingeniería Biomédica de la UAM-I ha estado desarrollando dentro de nuestro laboratorio de instrumentación.

La profesora Fabiola Martínez nos presenta un panorama de las nuevas oportunidades y tendencias en la ingeniería clínica en su trabajo "Healthcare 5.0: Oportunidades en IC".

La Maestra Diana Martínez Cancino, ex alumna del posgrado de Ingeniería Biomédica presenta un artículo sobre estimulador magnética transcraneal.

La Dra. Diana Osorio Londoño, ex alumna del posgrado en IB presenta un artículo acerca de los trabajos que se están realizando por el equipo de ingeniería de tejidos que se compone de investigadores del CI3M y del Área de Física de la División de CBI.

El Ing. Rafael Lara y otros colaboradores del grupo de resonancia magnética presentan una visión acerca de la importancia de la imagenología por resonancia magnética en la última década.

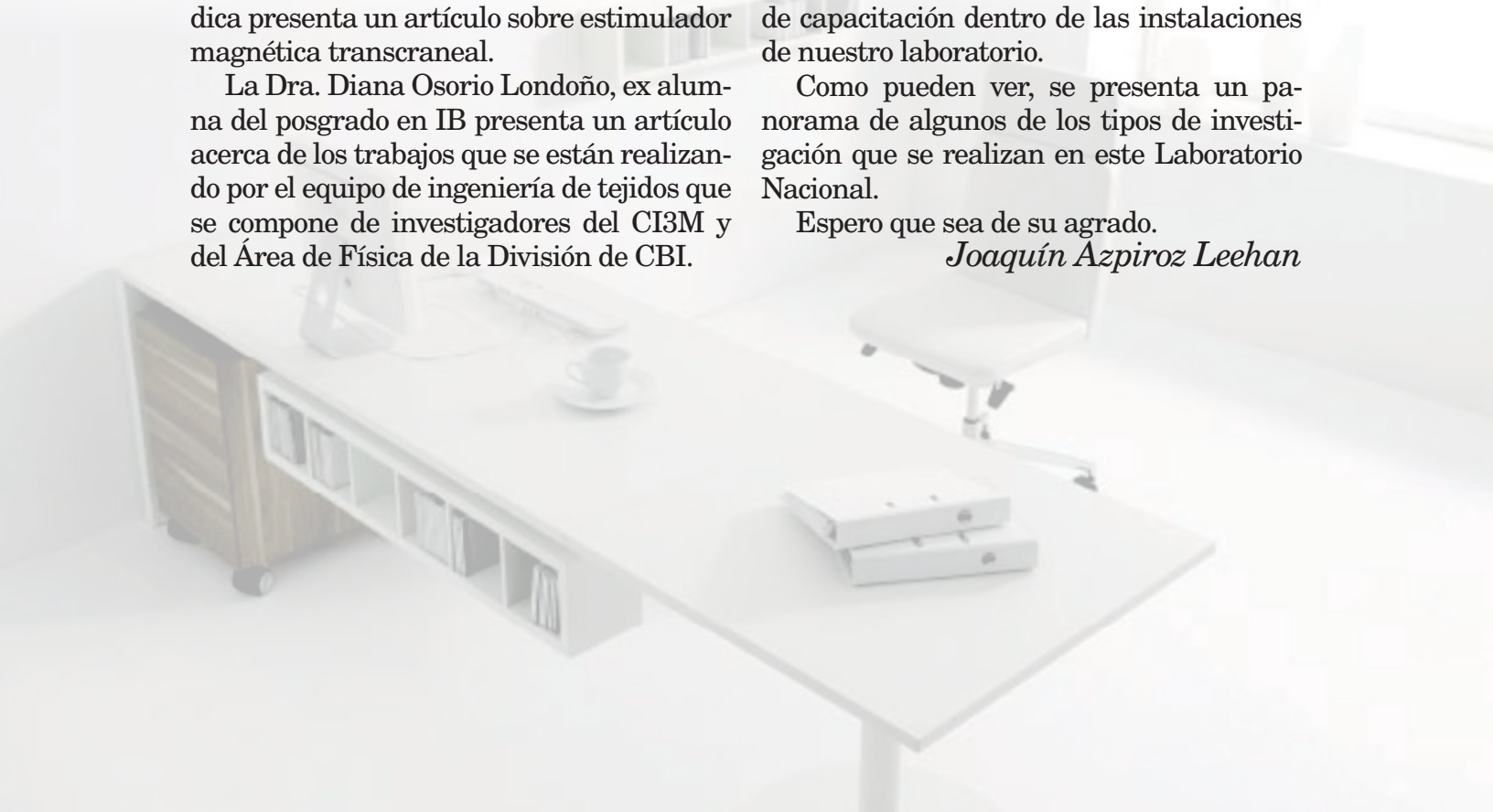
Un grupo de alumnos a nivel licenciatura del curso de Visualización por computadora de imágenes médicas nos presentan sus experiencias en la segmentación y la impresión 3D de imágenes tomográficas. Durante el curso, el proyecto final era visualizar un corazón, y junto con éste, detectar unos puentes o bypasses, lo que significó un reto importante en su trabajo. Este grupo de alumnos se compone de los dos equipos que mejores resultados obtuvieron en esta UEA.

Finalmente, la empresa Mindray nos presenta un trabajo titulado Mindray: un servicio más cercano y una atención médica para todos, donde se presenta la visión actual de sistemas de diagnóstico interconectado a la manera del Internet de las cosas. Mindray es una empresa con la que estamos colaborando para establecer un centro de capacitación dentro de las instalaciones de nuestro laboratorio.

Como pueden ver, se presenta un panorama de algunos de los tipos de investigación que se realizan en este Laboratorio Nacional.

Espero que sea de su agrado.

Joaquín Azpiroz Leehan



Información para autores

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería, Revista dirigida a profesores y a estudiantes de estas disciplinas.

Está registrada en el índice de revistas de divulgación de Conacyt, así como en Latindex, Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal.

Para publicar, los trabajos deberán ser originales y accesibles a un público amplio con formación media superior o universitaria pero no especializada; los temas deberán presentarse en forma clara. Cada colaboración debe incluir figuras, diagramas, ilustraciones, fotografías, etc. (otorgando el crédito correspondiente en caso de no ser original), que hagan más accesible la presentación.

Las secciones que la constituyen son:

- 1. Divulgación.** Artículos que presentan temas científicos con enfoques novedosos y accesibles (15 cuartillas).
 - 2. Educación científica.** Enfoques originales en la enseñanza de temas particulares (15 cuartillas).
 - 3. Artículos especializados.** Reportes breves de investigación, relacionados con una problemática concreta (15 cuartillas).
 - 4. Crónicas.** Historia y desarrollo de conceptos científicos, así como teorías alternativas (15 cuartillas).
 - 5. Divertimentos.** Juegos y acertijos intelectuales (5 cuartillas).
 - 6. Noticias breves.** Información de actualidad en el mundo de la ciencia (4 cuartillas).
 - 7. Los laureles de olivo.** Los absurdos de la vida cotidiana y académica (4 cuartillas).
- En todos los casos se debe incluir los nombres completos de los autores con su adscripción, dirección, teléfono y dirección de correo electrónico.

Normas

Las colaboraciones a las secciones 1 a 4 deberán ajustarse a las siguientes normas:

1. Resumen escrito en español e inglés.
2. 4 palabras clave en español e inglés.
3. Cuando se incluya una abreviatura debe explicarse por una sola vez en la forma siguiente: Organización de los Estados Americanos (OEA). . .
4. Cuando se utilice un nombre técnico o una palabra característica de una disciplina científica deberá aclararse su significado de la manera más sencilla posible.

5. Las citas textuales deberán ir de acuerdo al siguiente ejemplo: En cuanto la publicación del placebo se asevera que “el efecto placebo desapareció cuando los comportamientos se estudiaron en esta forma” (Núñez, 1982, p.126).

6. Las referencias (no más de 10) se marcarán de acuerdo al siguiente ejemplo: Sin embargo, ese no es el punto de vista de la Escuela de Copenhague (Heisenberg, 1958), que insiste en. . .

7. Al final del artículo se citarán las referencias por orden alfabético de autores. Pueden añadirse lecturas recomendadas (no más de 5).

8. Cada referencia a un artículo debe justarse al siguiente formato: Szabadváy, F. y Oesper, E., Development of the pH concept, J. Chem. Educ, 41 [2], pp.105 -107, 1964.

9. Cada referencia a un libro se ajustará al siguiente formato: Heisenberg, W., Physics and Philosophy. The Revolution in Modern Science, Harper Torchbook, Nueva York, pp.44-58, 1958.

10. Para páginas electrónicas: dirección (fecha de acceso).

11. Los títulos de reportes, memorias, etcétera, deben ir subrayados o en itálicas.

Envío y características del artículo

El envío del artículo deberá ser en archivo electrónico, en Word, tipo de letra Times New Roman, tamaño 12 con interlineado sencillo y uso de editor de ecuaciones.

En el caso de ilustraciones por computadora (BMP, JPG, TIFF, etc.) envíelos en archivos por separado. El material es recibido en:

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería.

UAM – Iztapalapa, T144,

Información: cts@xanum.uam.mx,

Tel. 5804-4600. Ext. 1144.

Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186.

C.P. 09310

Arbitraje

El Comité utiliza un sistema de arbitraje anónimo que requiere un mes. Se entiende que los autores no han enviado su artículo a otra revista y que dispondrán de un plazo máximo de un mes para incorporar las observaciones de los árbitros.

La decisión final de publicar un artículo es responsabilidad exclusiva del Comité Editorial.

Responsabilidad compartida entre Ciencia y Bioética en la experimentación con animales

Yessica Heras Romero¹,
Axayácatl Morales Guadarrama²,
Elizabeth Téllez Ballesteros^{3*}

¹Departamento de Física, División de Ciencias Básicas e Ingeniería,
Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa

²Departamento de Ingeniería Eléctrica, División de Ciencias Básicas e Ingeniería,
Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa

³Departamento de Biología Educativa, Facultad de Ciencias, UNAM



Resumen

La Bioética en el uso de animales en la investigación biomédica busca equilibrar el avance científico con la responsabilidad ética, promoviendo prácticas que minimicen el sufrimiento animal y optimicen la calidad de los resultados. Este documento destaca la relevancia de los animales en la investigación médica básica y clínica, subrayando su papel en la comprensión de procesos biológicos y el desarrollo de terapias. Sin embargo, también analiza cómo la adopción de principios como las 3R (reemplazo, reducción y refinamiento) ha contribuido a reducir su uso a nivel global, respaldado por tecnologías avanzadas, como órganos-en-un-chip y modelos computacionales. Además, propone la estrategia de la responsabilidad compartida entre Ciencia y Bioética que resalta la importancia de una colaboración global entre científicos, instituciones y la sociedad para garantizar prácticas humanitarias y responsables. Avanzar hacia una Ciencia más ética, innovadora y sostenible requiere un compromiso con el bienestar animal, el cumplimiento de normativas y la integración de enfoques alternativos que respeten los valores éticos contemporáneos.

Palabras clave: experimentación animal, Ciencia del Bienestar Animal, Bioética, responsabilidad compartida

Abstract

Bioethics in the use of animals in biomedical research aims to balance scientific progress with ethical responsibility, promoting practices that minimize animal suffering and optimize the quality of results. This paper highlights the relevance of animals in basic and clinical medical research, underlining their role in understanding biological processes

and developing therapies. However, it also discusses how the adoption of principles such as the 3Rs (replacement, reduction, and refinement) has contributed to reducing their use globally, supported by advanced technologies such as organs-on-a-chip and computational models. In addition, it proposes the strategy of shared responsibility between Science and Bioethics that highlights the importance of global collaboration between scientists, institutions and society to guarantee humanitarian and responsible practices. Moving towards a more ethical, innovative and sustainable science requires a commitment to animal welfare, compliance with regulations and the integration of alternative approaches that respect contemporary ethical values.

Keywords: animal research, Animal Welfare, Bioethics, shared responsibility

1. Introducción

Actualmente, la sociedad tiene en la mira cualquier actividad que pueda vulnerar a ciertos individuos. Cada vez se constituyen más grupos de personas organizadas y activistas que cuestionan situaciones que afecten los derechos humanos, actos de crueldad con animales o actividades extractivistas que socaven la sostenibilidad o promuevan la extinción del medio ambiente y de los seres vivos que lo habitan.

Esto tiene implicaciones en la manera en que nos vinculamos e incluso hasta cómo hablamos. Por tal razón, se educa con perspectiva de género y se utiliza el lenguaje incluyente. En la tecnología hablamos de “gepetear” cuando usamos ChatGPT. Y en el ámbito de los animales estos cambios no se han quedado atrás. Ahora se protege a los animales de cualquier acto de crueldad

y se considera a los animales compañeros como parte de la familia multiespecie.

Aunque muchas personas no estén de acuerdo con estos neologismos, se tratan de cambios que la sociedad ha promovido y que seguramente llegaron para quedarse. Es decir, no se trata de modas, son cambios importantes exigidos por la misma sociedad para vincularse de una manera distinta, menos discriminatoria, extendida hacia otros seres vivos y que nos permiten desarrollar nuevas ideas, identidades y seguir innovando en el conocimiento del mundo que nos rodea.

Concretamente con los animales, actualmente se reconoce que se trata de seres vivos, sintientes y que más que poseerlos debemos tutelarlos, protegerlos y ser responsables con sus vidas, estos puntos se han incluido en la Constitución Política de la República Mexicana (arts. 3°, 4° y 73°)⁴, lo cual constituye un hito en nuestro país.

Por tal razón es urgente que tanto la Ciencia como la Bioética dialoguen continuamente y se nutran de estos cambios que surgen desde ambos campos del conocimiento. Máxime cuando hablamos de animales utilizados en la experimentación.

¿Qué dice la Ciencia en torno a la experimentación animal?

Desde la Ciencia se reconoce que la investigación biomédica ha desempeñado un papel importante en el avance de la medicina y la mejora de la calidad de vida tanto de los humanos como de los anima-

les y del ambiente.

Sin embargo, un componente recurrente en este campo es el uso de animales no humanos. Los modelos animales han sido esenciales para identificar mecanismos subyacentes a enfermedades de gran importancia en la salud pública como el cáncer, la diabetes y patologías neurodegenerativas, así como para proponer intervenciones terapéuticas (Perlman et al., 2020).

Esta práctica, sin embargo, plantea inquietudes éticas relacionadas con el bienestar animal, dado que según datos recientes, se estima que más de 100 millones de animales son utilizados anualmente en experimentos científicos en todo el mundo (Helppi et al., 2021).

Diversos grupos científicos defienden que los ensayos preclínicos en animales no humanos son indispensables para cumplir las regulaciones internacionales y garantizar que un medicamento o terapia no sea perjudicial. Un ejemplo muy reciente, es el desarrollo de vacunas contra enfermedades como el COVID-19 que se basaron en estudios preclínicos realizados en ratones y primates no humanos (Dörner & Radbruch, 2021). Es decir, es innegable el beneficio a nivel mundial de este tipo de intervenciones de la Ciencia.

Entonces, para evitar un uso indiscriminado de animales se implementan criterios científicos rigurosos que permita priorizar el uso de animales sólo cuando sea estrictamente necesario, de tal forma que de acuerdo con Smith y colaboradores (2022), basta realizar una evaluación preliminar adecuada y con ello se puede

⁴ <https://prime.tirant.com/mx/actualidad-prime/reforma-constitucional-en-materia-de-proteccion-y-cuidado-animal/>



Figura 1. Aspectos que considerar para que los animales vivan con buenos niveles de bienestar

reducir el uso de animales hasta en un 25% sin comprometer la validez científica (Smith et al., 2022).

En vista de que todavía se requiere el uso de animales para desarrollar conocimiento, desde hace más de 30 años se ha buscado mejorar las condiciones bajo las que produce, mantiene y trabaja con dichos animales, desde la **Ciencia del Bienestar Animal**.

Básicamente, se habla de que un animal se encuentra en bienestar cuando si (según indican pruebas científicas) está sano, cómodo, bien alimentado, en seguridad, puede expresar formas innatas de comportamiento y si no padece sensaciones desagradables de dolor, miedo o desasosiego (OMSA, 2019). Aquí es importante entender que, aunque pareciera que el bienestar animal depende de lo que les proveamos, realmente se asocia con el *estado del animal* o la manera en que los animales se adaptan a las condiciones de su entorno y pueden mantener un equilibrio en su salud (física) y emocional (mental). Por consiguiente, podríamos tenerlos en instalaciones ul-

tramodernas o “jaulas de oro”, pero podrían seguir estresados si no cubrimos sus necesidades vitales.

Por lo tanto, en las últimas décadas se han desarrollado formas de medir si los animales se están adaptando y esto se lleva a cabo mediante los cinco dominios del bienestar animal (Figura 1).

Dichos dominios se explican a continuación:

- Nutrición**: que los animales tengan acceso al agua y alimento nutritivo.
- Alojamiento**: que tengan acceso a un ambiente cómodo, limpio y con espacio suficiente.
- Salud**: evitarles enfermedades, lesiones o sufrimiento físico o mental; en caso de presentar lo anterior, que cuenten con atención médica veterinaria siempre disponible.
- Comportamiento**: brindando enriquecimiento del ambiente para estimular comportamiento de juego o exploración

y que puedan interactuar de forma agradable con sus congéneres, el medio ambiente y los seres humanos.

- e) Mental: que tengan experiencias positivas y evitarles aquellas negativas.

Derivado de lo anterior, se puede aplicar ampliamente la Ciencia del Bienestar Animal para mejorar las condiciones en las que se trabaja con los animales usados en la experimentación científica.

El bienestar animal es un pilar ético fundamental en tanto que reconoce a los animales como individuos con necesidades. Seguir las recomendaciones para garantizar el bienestar animal no solo cumple un objetivo ético, sino que también beneficia a la investigación. Varios estudios han demostrado que animales menos estresados presentan datos experimentales más consistentes y reproducibles, lo que mejora la calidad de los resultados y la eficiencia de los experimentos (Reinhardt, 2019).

¿Qué responde la Bioética?

Desde la Bioética se argumenta que los animales tienen intereses y en este caso el concepto ético de interés es equivalente al concepto científico de necesidad.

Para entenderlo mejor podemos retomar lo que dice el filósofo australiano Peter Singer (1999), quien esgrime que los animales vertebrados -incluido el ser humano- cuentan con Sistema Nervioso Central (SNC). En consecuencia, son capaces de tener experiencias positivas y negativas. A los individuos con esta capacidad se les conoce como sintientes y su interés es

mantener su vida, buscar su alimento, resguardarse en una madriguera, cuidar a su progenie y evitar el dolor. Si realizamos acciones que no consideren sus intereses, entonces estamos discriminándolos de forma negativa, es decir, estamos incurriendo en especismo⁵.

Si se aplica lo anterior en los animales que se usan como modelos experimentales, se debería causar el menor dolor y sufrimiento posible y fomentar experiencias positivas con manejo de juego antes de los procedimientos que les puedan incomodar.

Otra posible explicación la encontramos en la propuesta a favor de la defensa de los derechos de los animales del filósofo norteamericano Tom Regan (2016), quien nos previene de que los animales no deben ser cosificados o instrumentalizados como medios para obtener nuestros fines. Ya desde 1984, Regan sabía que la Ciencia había demostrado que los animales contaban con estados mentales -y que eran conscientes- lo que le sirvió de sustento para conferirles valor inherente o intrínseco independientemente de su valor económico, zootécnico o afectivo. Para evitar que los cosifiquemos les reconoce derechos morales como pacientes morales; es decir, que no tienen obligaciones, pero sí cuentan con el derecho básico a no ser dañado y varios derechos más. Este también es el caso de las infancias y de los pacientes con retraso mental grave o enfermedades mentales, quienes son tutelados, por ende, los animales también deben ser tutelados. En el caso de la humanidad, seríamos agentes morales tanto con derechos como obligaciones, por lo que nuestras acciones

⁵ El especismo es similar a otras formas de discriminación como el racismo, sexismo, capacitismo, edatismo, etc.

pueden dañarlos o beneficiarlos. Así, la consigna de los derechos de los animales es reconocer tales derechos y fomentar su protección y trato respetuoso.

Los animales que se solicitan a los bioterios para experimentar con ellos usualmente son asentados dentro de los protocolos y publicaciones como “modelos o material biológico”, tal vez para evitar que las personas que trabajan con ellos no se sientan tan mal por lo que les van a hacer. Pero siguiendo la propuesta de Tom Regan, se deberían reconocer como *sujetos* que forman parte del estudio. El cambio en la manera en que se nombran sí genera un impacto en el cuidado hacia los individuos, a diferencia de cuando se piensa que son cosas o material fácilmente reemplazable y desechable. Además, deben ser tutelados por las personas investigadoras o un comité⁶ que revise que las condiciones en las que se van a trabajar sean adecuadas.

Por último, queremos señalar el importante aporte del filósofo norteamericano Paul Taylor (1989), quien reconoce que cuando se tiene que trabajar con otros seres vivos surgen conflictos de intereses de nuestra especie con el de otras especies. Así, propone principios para tratar de resolver dichos conflictos. A continuación, se ejemplifica su aplicación:

a) Supervivencia: se deben desarrollar sólo aquellas investigaciones que realmente benefician a la humanidad, animales o medio ambiente. A veces se llevan a cabo experimentos por pura curiosidad o para publicar, lo que no se

puede justificar desde la ética.

b) Proporcionalidad de intereses: distingue entre intereses vitales y secundarios siendo los intereses vitales los que deben pesar más en la balanza. Si se quiere saber que un cosmético no sea tóxico se realiza una prueba de irritación ocular o dérmica en conejos albinos que les puede lesionar causando úlceras, dolor y sufrimiento, lo que afecta su interés vital. En el caso de las personas que consumimos esos cosméticos el interés en juego de lucir maquillado o perfumado es secundario, por lo que debe importar más el interés vital del conejo. Pero si requiero desarrollar una investigación que aporte nuevo conocimiento a favor de los intereses vitales, paso al siguiente principio.

c) Justicia distributiva: si necesito desarrollar un tratamiento contra una enfermedad debo trabajar con animales que también la presenten y que puedan beneficiarse de los resultados obtenidos con ellos, no sin antes considerar el siguiente principio.

d) Mínimo daño: sabiendo que voy a dañar al individuo con el que voy a trabajar, debo utilizar los procedimientos menos invasivos y dolorosos, usando anestesia y analgesia para tratar de dañar lo menos posible al sujeto experimental.

e) Justicia restitutiva: en ocasiones se puede evitar matar a los animales usados en los experimentos, restaurando su salud y brindándoles una buena vida. Desafortunadamente esto es complicado debido a los costos que implicaría,

⁶ En nuestro país se conocen como CICUALES o Comité Interno para el Cuidado y Uso de los Animales de laboratorio (numeral 4, NOM- 062-ZOO-1999).

pero cada vez más laboratorios buscan esta opción o en su defecto, disminuir el número de animales usados.

¿En qué radica la Responsabilidad Compartida entre Ciencia y Bioética?

Se tiene la falsa idea de que la investigación científica tiene que estar vigilada por la ética. Pareciera como si el papel de la ética fuera obligar y sancionar a quienes no actúen según una determinada norma aceptada dentro de un grupo, pero esto no es ética, sino moral. La ética y la Bioética más bien fomentan un análisis crítico y racional de la moralidad y no obliga a nadie a actuar de tal o cual manera (lo que sí ocurre con las actitudes dogmáticas).

Lo que pretende la ética es que, desde la autonomía de cada quien, se realicen acciones que permitan una convivencia adecuada dentro de la sociedad. La Bioética hace lo mismo, al favorecer la reflexión de lo que hacemos a la vida, a los animales; además, es propositiva. No tiene sentido polarizar el discurso sin proveer alternativas, propuestas y opciones para resolver el dilema de la experimentación animal. Sobre todo se debe entender que la Ciencia y la Bioética no son enemigas, sino que persiguen el mismo objetivo: la felicidad y el bienestar.

No se trata de limitar el avance de la ciencia, ni tampoco dar cabida a todo tipo de investigaciones. Se trata de un dilema en el que pueden surgir múltiples soluciones y tal vez ninguna nos convenza del todo. Pero desde una postura utilitarista, se requiere tomar una decisión práctica en la que o se utilizan algunos animales o no se obtendrá conoci-

miento para curar alguna enfermedad.

Es importante reconocer que a partir del conocimiento obtenido por la Ciencia se sabe que los animales son seres sintientes y conscientes, que se vinculan afectivamente con otros individuos y que tienen intereses y necesidades. Este conocimiento tiene más implicaciones científicas, éticas y legales que inciden en la experimentación con animales.

Fueron los científicos Russell y Burch quienes aportaron la estrategia científica que satisface a la ética para trabajar de forma humanitaria con los animales. Ellos son el claro ejemplo de la responsabilidad compartida entre Ciencia y Bioética. Es conocimiento que existe desde el siglo pasado, pero desafortunadamente se desconoce o no se aplica.

Por ejemplo, dentro de la propuesta de las tres erres de Russell y Burch (1959)⁷ tenemos la urgente necesidad de promover alternativas que reemplacen animales. Ya existen múltiples herramientas tecnológicas como cultivos celulares tridimensionales, órganos-en-un-chip y simulaciones computacionales avanzadas que han demostrado ser eficaces para replicar respuestas humanas. Un excelente ejemplo de ello son los órganos-en-un-chip pueden replicar con una precisión del 90% las respuestas humanas a fármacos, reduciendo significativamente la necesidad de modelos animales (Bhatia & Ingber, 2020). Pero todavía se observa una gran resistencia por parte de la comunidad científica para conocerlas, implementarlas y publicar con ellas.

En cuanto a los experimentos en los que todavía no se puede prescindir de los anima-

⁷ Reemplazar, reducir y refinar.

les, en apego al principio de mínimo daño, se debe disminuir el número de animales utilizados y refinar las técnicas experimentales, identificando y definiendo los puntos terminales. Esto incluye el monitoreo de signos de dolor y el uso de criterios definidos para detener experimentos antes de causar sufrimientos innecesarios (Andersen et al., 2020). Además, se deben promover experiencias positivas de interacción humano-animal, en la que se genere una relación adecuada entre todas las personas involucradas en su cuidado, trabajo de investigación, estudiantado en capacitación, pues se reduce el estrés y mejora la calidad de los datos experimentales. Como menciona Reinhardt (2019) la capacitación en manejo compasivo es esencial para garantizar tanto el bienestar animal como la validez científica. Proveer condiciones que permitan comportamientos naturales mejora la validez de los resultados experimentales y reduce el estrés fisiológico. Estrategias como el enriquecimiento ambiental y nutricional son esenciales para garantizar el bienestar de los animales (Krohn et al., 2021). No obstante, en nuestro país todavía se pone de pretexto la limitación económica para refinar, siendo que se gasta una gran cantidad de dinero en investigaciones no concluyentes.

Lo anterior ya se encuentra asentado en normativas nacionales e internacionales⁸ que no solo mejoran el bienestar animal, sino también garantizan resultados más consistentes y reproducibles, fortaleciendo la confianza pública en la investigación científica (Kilkenny et al., 2019).

La integración de una postura ética basada en la Responsabilidad Compartida ofrece un enfoque ético que integra la colaboración, entre científicos, instituciones y la sociedad para garantizar prácticas humanitarias y responsables. Sus principios clave son los siguientes:

1. Reconocer que los animales utilizados en investigación son seres sintientes capaces de experimentar dolor y sufrimiento emocional, por tanto es imprescindible su protección en entornos de investigación (Broom, 2017).
2. Aplicación estricta de los principios de las 3R. Siempre que sea posible utilizar métodos alternativos que no involucren animales; minimizar el número de animales utilizados mediante diseños experimentales eficientes y el uso de técnicas estadísticas adecuadas sin comprometer la validez de los resultados (Festing, 2018); mejorar los procedimientos minimizando el dolor y el estrés, proporcionando cuidados adecuados y ambientes enriquecidos. (Hawkins, 2017).
3. Capacitación continua. Es esencial que el estudiantado y personas investigadoras reciban capacitación en Bioética y Bienestar Animal para asegurar la implementación adecuada de prácticas humanitarias que han demostrado mejorar las actitudes y comportamientos hacia los animales de laboratorio (Schuppli et al., 2019).

⁸ NOM-062-ZOO-1999 (México): Lineamientos específicos para el cuidado y uso de animales de laboratorio; European Directive 2010/63/EU: Promueve las 3R y el bienestar animal en la Unión Europea; Guide for the Care and Use of Laboratory Animals (NIH, EE.UU.): Estándares detallados para el manejo ético de animales; Animal Welfare Act (EE.UU.): Regula el tratamiento de animales en investigación, transporte y exhibición.

4. Participación general: Involucrar a todos en discusiones sobre el uso de animales no humanos en Ciencia promueve una comprensión mutua y el desarrollo de políticas que reflejen valores compartidos. La participación pública en debates bioéticos puede influir positivamente en las políticas de investigación y en la aceptación social (Owen et al., 2017).

La investigación biomédica enfrenta el desafío de equilibrar los avances científicos con la responsabilidad ética hacia los animales. El futuro de la investigación biomédica requiere una colaboración global efectiva, el cumplimiento de normativas éticas y la implementación de tecnologías sostenibles para garantizar avances que beneficien a todos los seres vivos y fomenten una relación armoniosa entre la Ciencia y la Bioética. Adoptar una actitud responsable y ética frente al uso de seres vivos es esencial para avanzar hacia una Ciencia más compasiva y respetuosa.

Adoptar la Bioética de la Responsabilidad Compartida implica un compromiso colectivo para avanzar en la Ciencia de manera ética, reconociendo nuestra obligación moral hacia los animales y la sociedad. Este enfoque promueve la innovación responsable y la búsqueda constante de alternativas que respeten la vida animal, alineándose con los valores éticos contemporáneos y las expectativas sociales.

Referencias

Baumans, V. The welfare of laboratory animals. *Laboratory Animals*, 52[5], pp. 481-490, 2018.

Broom, D. M. Cognitive ability and awareness in domestic animals and decisions

about obligations to animals. *Applied Animal Behaviour Science*, 187, pp. 1-9, 2017.

Kilkenny, C., Browne, W. J., Cuthill, I. C., Emerson, M., & Altman, D. G. Improving bioscience research reporting: The arrive guidelines. *PLOS Biology*, 8[6], 2019.

OMSA-Organización Mundial de Sanidad Animal, Código Sanitario para los Animales Terrestres. Capítulo 7.1, <https://www.woah.org/es/que-hacemos/normas/codigos-y-manuales/acceso-en-linea-al-codigo-terrestre/>

Olsson, I. A. S., Franco, N. H., & Sandøe, P. Ethical regulation of animal research. *Bioethics*, 31[4], 245-251, 2017.

Reinhardt, V. The well-being of laboratory animals. *Animal Welfare*, 28[3], 207-212, 2019.

Regan, Tom. En defensa de los derechos de los animales, Fondo de Cultura Económica, México, 2016.

Russell, William y Burch, Rex, *The Principles of Humane Experimental Technique*, 1959, cap. 4, http://altweb.jhsph.edu/pubs/books/humane_exp/chap4d

Singer, P. *Liberación animal*, 2ª ed, Madrid, España: Trotta, 1999

Taylor, P.W. *Respect for Nature. A Theory of environmental ethics*, 2a. ed., Princeton, Estados Unidos de América: Princeton University Press, 1989.

Cada referencia a un libro se ajustará al siguiente formato:

Heisenberg, W., *Physics and Philosophy. The Revolution in Modern Science*, Harper Torchbooks, Nueva York, 1958, pp.44-58.

Lectura complementaria

1. NOM-062-ZOO-1999 (México). Lineamientos para el cuidado y uso de animales de laboratorio.
2. European Directive 2010/63/EU. Directiva de la Unión Europea sobre la protección de animales utilizados con fines científicos. (European Commission, 2010). <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/63/oj>
3. International Council for Laboratory Animal Science (ICLAS): Establece estándares globales para la ética y cuidado de los animales usados en investigación. <https://iclas.org/>
4. Guide for the Care and Use of Laboratory Animals (NIH, EE.UU.). Guía para el cuidado y uso de animales de laboratorio. (NIH, 2011).
5. Animal Welfare Act (EE.UU.). Ley de Bienestar Animal que regula el trato de los animales en investigación y otras actividades. (USDA, 2021).

Concentradores de Oxígeno para uso médico



Fernando Prieto y Hernández
Centro de Investigación en Imagenología e Instrumentación Médica
(CÍM). Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa

Resumen

Los concentradores de oxígeno son un recurso indispensable para tratar enfermedades y condiciones que afectan la función respiratoria de forma repentina, epidémica, endémica o crónica.

Los procesos de adsorción son un campo promisorio de investigación y desarrollo en las ciencias básicas, de materiales y de la salud.

También, son importantes, en ingeniería química, de energía, mecánica, electrónica y de control.

Los concentradores ocupan un nicho en crecimiento en el mercado del oxígeno, sobre todo si es conveniente o necesario producirlo en el sitio de uso.

Hemos desarrollado un prototipo de concentrador de pequeño tamaño y esperamos dar pasos firmes para su comercialización.

Desarrollos como este son de mucha trascendencia social.

Palabras clave: Concentrador de Oxígeno, Adsorción, Oxigenoterapia, Enfermedades Respiratorias.

Abstract

Oxygen concentrators are an essential asset in the care of diseases and conditions that affect respiratory function in a sudden, epidemic, endemic or chronic situation.

Adsorption processes are a promising research and development field in basic, materials, and health science; they are also important in chemical, energy, mechanical, electronic and control engineering.

Concentrators occupy a growing niche in the oxygen market especially when it is convenient or necessary to produce oxygen at the site of use.

We developed a small concentrator prototype and plan to take firm steps to commercialize it.

Developments like this are of high social significance.

Keywords: Oxygen concentrator, Adsorption, Respiratory diseases, Oxygen therapy.

Introducción

El oxígeno se ha utilizado para usos médicos desde hace más de un siglo. Hubo intentos pioneros como el de George Holtzaple en 1885 de usar oxígeno para personas con enfermedades respiratorias como la neumonía (Shultz SM, 2005). El médico estadounidense Alvan Barach sugirió que el oxígeno podría ser útil en el tratamiento a largo plazo de las enfermedades pulmonares, (Barach, 1922), continuó promoviendo su empleo y diseñó dispositivos para administrarlo a los pacientes.

En 1934 Arnold O. Beckman inventó el primer analizador electrónico de pH que alcanzó éxito comercial (Science History Institute). La poliomielitis, que azotó Europa y Norteamérica a mediados del siglo XX, fue un hecho inusitado que tomó a la comunidad médica sin medios diagnósticos y terapéuticos para enfrentarla. (Ballester R, 2012) El uso del oxígeno y de aparatos de ventilación artificial en diversas versiones, estuvieron entre los primeros recursos en desarrollarse. Los primeros analizadores de pH seguramente fueron de valor para diagnosticar y vigilar la falla respiratoria entre 1949 y 1952.

El análisis de O_2 , CO_2 y pH en la sangre arterial revolucionó el diagnóstico, vigilancia y tratamiento de la falla respiratoria. Su uso se extendió rápidamente desde mediados del siglo XX. Actualmente, en unidades de terapia intensiva, quirófanos y servicios de emergencia, es esencial contar con análisis de gases en sangre arterial inmediatos y repetidos. Los analizadores de gases en sangre, hoy en día, dan multitud parámetros no solamente gasométricos, sino de hemoglobina, equilibrio ácido-base, y metabólicos en segundos y en menos de 0.1 mL de sangre.

La oxigenoterapia ha salvado muchas vidas y mejora la calidad de vida de pacientes con insuficiencia respiratoria crónica. Para ello hay que contar con aportes confiables de oxígeno (cilindros de O_2 a presión, O_2 líquido en tanques criogénicos, concentradores de oxígeno móviles, estacionarios o portátiles) en los centros de atención médica, las ambulancias, a domicilio y portátiles. Este recurso es muy necesario para los pacientes agudos y crónicos, lo mismo el hospital o clínica, que en casa o durante sus actividades diarias. En 1965 el Dr. Thomas Petty (1932-2010) entonces joven docente médico en la Universidad de Colorado recibió el encargo de evaluar un novedoso prototipo de equipo para la oxigenoterapia, se apasionó con el tema y se dedicó a contrarrestar la idea de que el oxígeno era peligroso para los pacientes con enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC); sus investigaciones sentaron las bases para la **oxigenoterapia a largo plazo (OTLP, LTOT en inglés)**, en pacientes ambulatorios (Heffner, 2013).

Los concentradores de oxígeno tuvieron un papel crucial en el tratamiento de pacientes durante la pandemia de COVID-19. Este

recurso contribuyó de manera crucial a la recuperación de muchos pacientes con niveles de oxígeno peligrosamente bajos que no pudieron ser tratados en un hospital.

Ventajas de los Concentradores de Oxígeno:

1. Se pueden utilizar en el hogar con más facilidad y menos riesgo que los cilindros de oxígeno.
2. Pueden proporcionar un suministro continuo de oxígeno mientras estén conectados a una fuente de energía eléctrica.
3. Al permitir que los pacientes con síntomas moderados reciban tratamiento en casa, ayudan a reducir la presión sobre los servicios hospitalarios y de emergencia.
4. La correcta oxigenación es crucial para la función celular y la recuperación general de los pacientes.

Durante la pandemia de COVID-19 aumentó grandemente la demanda de concentradores de oxígeno. La oferta no se pudo satisfacer debido a factores como:

1. Saturación de los servicios hospitalarios.
2. Restricciones de movilidad.
3. Interrupciones en la producción y el transporte de dispositivos.
4. Desigualdad en el acceso a servicios médicos entre países y grupos sociales (Ross M, 2023).

En el Centro de Investigación en Imageología e Instrumentación Médica (CI³M) en la UAM-Iztapalapa, comenzamos a tra-

bajar en un prototipo de concentrador de oxígeno para uso médico, el cual pensamos escalar a un prototipo para producción. Con esto deseamos servir a la comunidad y aportar al conocimiento científico y tecnológico. Pensamos desarrollar primeramente un concentrador portátil, en segundo lugar uno adecuado para su instalación en aparatos de anestesia y por último un concentrador estacionario de mediano tamaño para uso en el domicilio o en pequeñas clínicas.

Obtención de Oxígeno a partir del aire *Composición del Aire*

El aire es una mezcla de gases. Sus principales componentes son nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2) y argón (Ar), con cantidades pequeñas de otros gases. (Figura 1.)

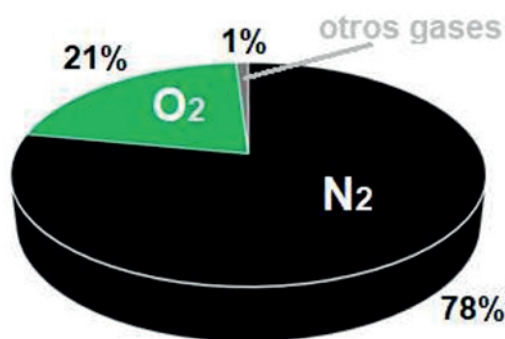


Figura 1. Composición aproximada del aire seco.

Nota: el aire húmedo contiene cierta cantidad de vapor dependiendo de la humedad relativa y de la temperatura ambiente.

Ilustración del autor.

Destilación fraccionada del aire líquido

La destilación fraccionada es el método más utilizado para obtener oxígeno puro del aire. Este proceso requiere grandes plantas industriales y produce grandes cantidades de nitrógeno, oxígeno, argón, xenón y neón. Hasta el momento domina

el mercado industrial, médico y científico de estos gases.

Concentradores por Adsorción

La adsorción consiste en que una sustancia, denominada adsorbato, que está dispersa o disuelta en un fluido (gaseoso o líquido) se adhiere a la superficie de otra sustancia sólida denominada adsorbente. Los adsorbentes, con frecuencia actúan atrapando el adsorbato por su tamaño o cargas moleculares, en ese caso se les conoce también como tamices moleculares.

Es muy conveniente y útil que la adsorción sea, por lo general, reversible. El proceso inverso a la adsorción se llama desorción y consiste en que el adsorbato se desprende del adsorbente, lo cual se puede favorecer mediante cambios de presión o de temperatura y mediante corrientes de fluido capaces de separar el adsorbato del adsorbente.

En la actualidad, para la separación del aire por adsorción, se cuenta con adsorbentes cada vez más eficientes.

Condiciones para la Separación del Aire

La separación del aire depende de los siguientes factores:

1. Tipo de adsorbente.
2. Selección del adsorbente
3. Diseño y control del proceso cíclico de adsorción-desorción.
4. Dimensiones y diseño de las columnas de adsorción.

Tipo de Adsorbente

Las zeolitas son minerales cristalinos com-

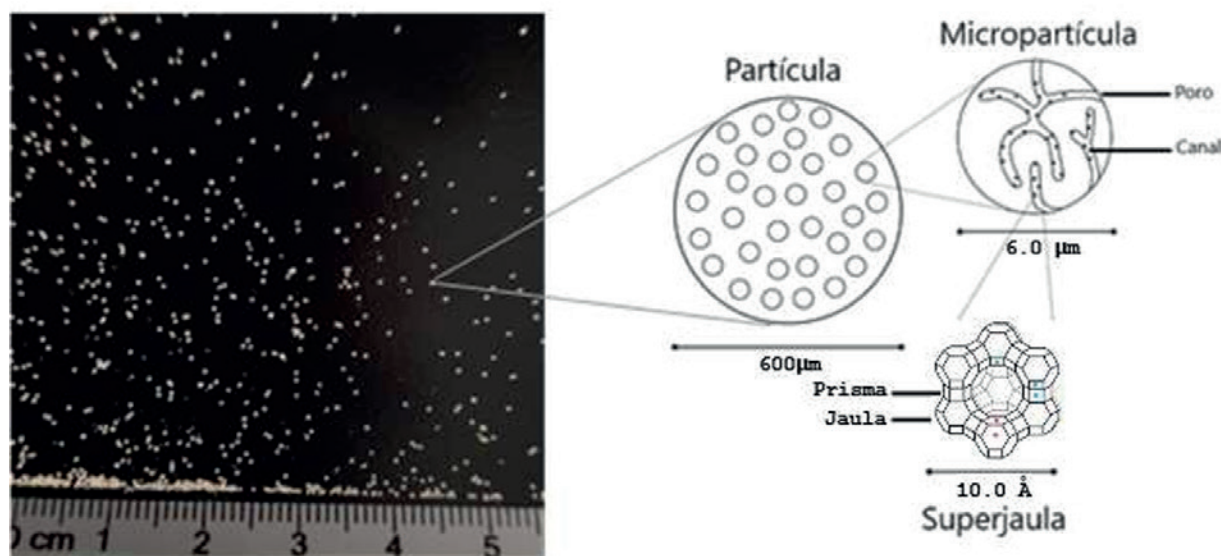


Figura 2. Zeolita LiLSX a diferente magnificación.

Izquierda: fotografía de las perlas de zeolita LiOX101® de Jalon®

Derecha, estructura microporosa (partícula y micropartícula) y cristalina (superjaulas, jaulas y prismas); los puntos de color en la superjaula son los sitios de los cationes no estructurales.

Fotografía del autor: Diagrama simplificado de:
(Mingfei P, 2017) y de (Overweg, 1998).

puestos por aluminio silicatos con una estructura tridimensional de tetraedros de SiO_4 y AlO_4 . Cada tetraedro comparte átomos de oxígeno con tetraedros vecinos y van formando así estructuras mayores (Mitra S, 2021).

A simple vista es evidente que se trata de materiales porosos. Los estudios al microscopio electrónico y por refracción de Rayos X revelan que se trata de materiales microporosos.

La menor carga positiva del aluminio es compensada de forma natural por cationes como sodio, potasio, calcio y otros. Estos cationes no forman parte del armazón cristalino básico, por lo que se les llama cationes no estructurales, pero ocupan si-

tios específicos dentro del armazón y son importantes para la adsorción. (Figura 2). Los cationes no estructurales se pueden cambiar mediante técnicas de intercambio iónico, esto permite modificar la capacidad adsorbente de la zeolita.

La zeolita que ha resultado más eficaz para adsorber nitrógeno y dejar pasar oxígeno es la zeolita LiLSX. En esta zeolita los iones nativos de sodio (Na^+) se han intercambiado por iones de litio (Li^+),¹ tiene baja proporción silicio/aluminio (LS: Low Silicon) y su estructura es del tipo X.²

El material viene en forma de *esferitas* o *perlas* de zeolita (*beads* en inglés)³ cuya forma y

¹ Existen también zeolitas sustituidas con calcio, plata y otros metales.

Todas las zeolitas de tipo X (faujasitas con Li, Ca, Ag y otros cationes) han probado ser útiles en la separación del aire.

² Las faujasitas existen en dos tipos de estructura X e Y. Las tipo Y tienen menor proporción Si/Al.

³ Diminutas esferas de 0.4 a 0.8 mm de diámetro.

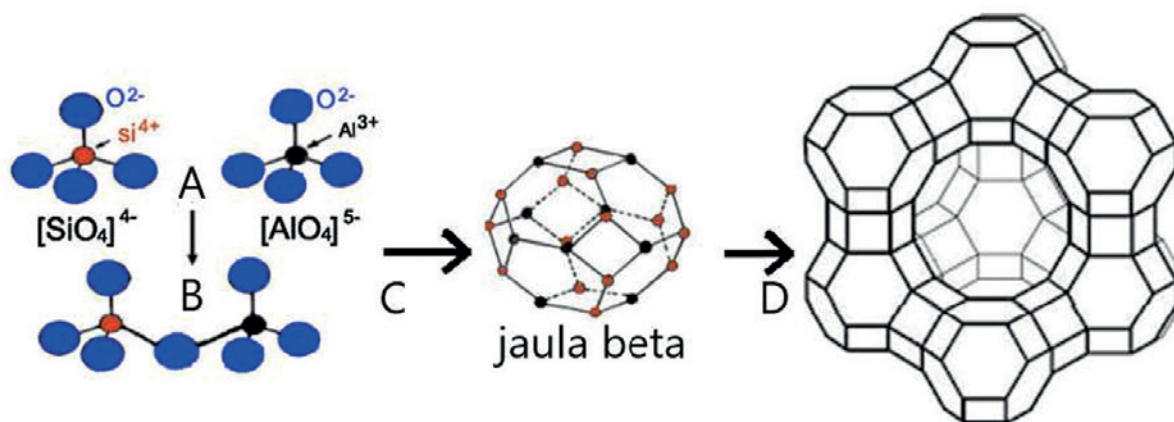


Figura 3. AlO_4 y SiO_4 en la estructura de las zeolitas.

A Oxidos de aluminio y de silicio. **B** tetraedros de alumino-silicato. **C** jaulas beta (nótese la presencia de silicio (círculos rojos) y aluminio (círculos negros) y cómo la estructura de tetraedros da origen a jaulas y prismas. **D** superjaulas formadas por prismas hexagonales y octaedros truncados que se unen formando anillos de 12 caras.

Diagrama adaptado de la Figura 1 de (Mitra S, 2021)

tamaño pueden variar según el tipo de concentraador. Las *perlas* se forman al aglutinar polvo de zeolita con caolín u otras arcillas.

La estructura microporosa y cristalina de la Zeolita que estamos utilizando es muy interesante y se ilustra en las Figuras 2 y 3.

Los tetraedros de SiO_4^{4-} y AlO_4^{5-} son la estructura primaria de la zeolita; entre ellos crean la estructura secundaria: un arreglo geométrico de cuadrados y hexágonos que a su vez se asocian formando prismas hexagonales y otros cuerpos geométricos tridimensionales, como el notable octaedro truncado o *tetrakaidecaedro*,⁴ que se ha encontrado en numerosos minerales porosos y en las espumas de polímeros viscoelásticos. El conjunto de estos armazones geométricos (superjaulas y más) va formando una estructura cada vez más compleja.

Como amante de la fisiología respiratoria, me fascina que en escritos recientes se habla del uso patrones geométricos parecidos a estos con el fin de obtener modelos matemáticos multinivel que conducen desde las propiedades viscoelásticas de cada acino pulmonar⁵ hasta las del pulmón completo, y predicen los resultados de los estudios de la función pulmonar en la salud y la enfermedad. (Hurtado DE, 2023)

Selección del Adsorbente

Para caracterizar el desempeño de los adsorbentes en la separación del aire, se utiliza algunos de los siguientes parámetros y técnicas:

- Capacidad de Adsorción estática y dinámica:
 - o La primera mide la cantidad de gas ad-

⁴ El nombre deriva del griego: tetrakaideca que significa 14. La figura está formada por ocho caras hexagonales y seis cuadradas.

⁵ Unidad anatómica y funcional del pulmón que se define como la porción del pulmón que recibe aire de un solo bronquiolo terminal.

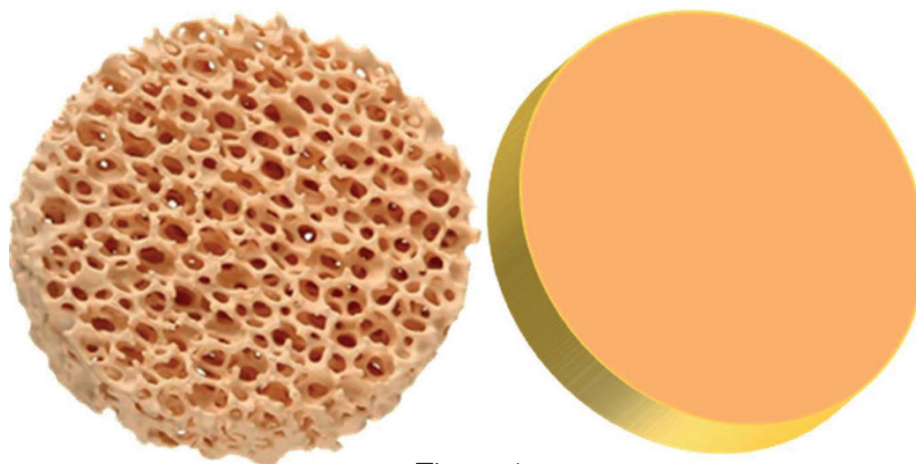


Figura 4.

A: Material poroso**B:** material macizo

Aun suponiendo una afinidad similar por el adsorbato, un adsorbente poroso presenta una mayor superficie para la adsorción.

sorbido por unidad de masa del adsorbente en condiciones de equilibrio.

- o La segunda la cantidad de gas adsorbido en flujo continuo antes de que el adsorbente se sature.

- Área de superficie y porosidad:

- o Son, respectivamente el área por unidad de masa que el adsorbente ofrece para la adhesión del adsorbato, y la distribución de tamaño de sus poros. Son características que determinan la capacidad de adsorción. (Figura 4).

- Selectividad:

- o La selectividad es la diferencia en la capacidad para adsorber cada componente. Puede medirse en mezclas de gases o en los gases puros por separado. (Figuras 5 y 6)

- Cinética de Adsorción:

- o Mide la rapidez con la que el adsorben-

te captura el gas.

- Isotermas de Adsorción:

- o Las isotermas indican cómo cambia la adsorción de cada gas a diferentes presiones y temperaturas. (Figuras 5 y 6)

- Estabilidad:

- o Evalúa el comportamiento del adsorbente a través de múltiples ciclos de adsorción y desorción.

- Resistencia Mecánica:

- o Cuánto tiempo resiste el adsorbente la abrasión y compresión que experimenta en condiciones operativas.

- Termogravimetría (TGA):

- o Proporciona información sobre la estabilidad térmica.

El artículo de Wu (Wu C-W, 2014), contiene estudios experimentales cuidadoso-

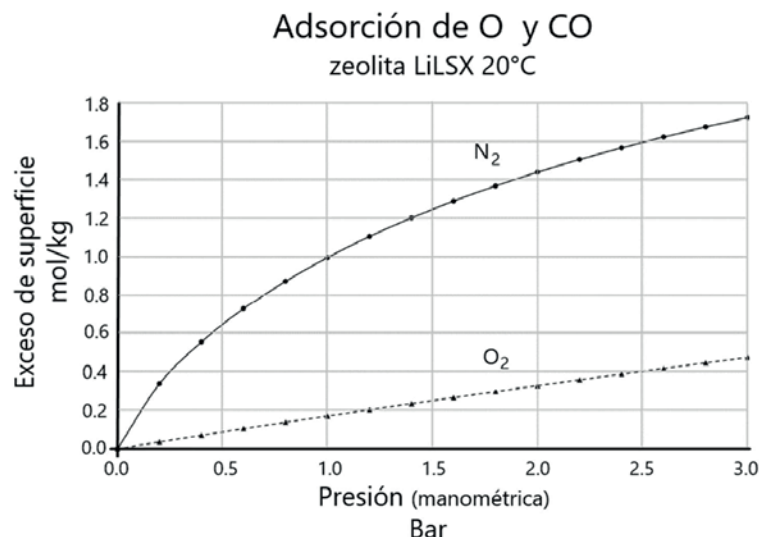


Figura 5. La diferente capacidad de adsorción de N₂ comparada con la de adsorción de O₂ se aprovecha para obtener oxígeno a partir del aire.

Gráfica basada en (Mingfei P, 2017)

En zeolita LiLSX comercial y es el único que encontré en la literatura que da una descripción detallada de las propiedades de adsorción de N₂ y O₂ puros y ante mezclas con diferentes proporciones de N₂ y O₂. (Figura 6)

Diseño y Control del Proceso Cíclico de Adsorción-desorción

La afinidad la zeolita LSLiX por el nitrógeno es mayor que por el oxígeno (Figura 5). El grado de afinidad aumenta con la presión y disminuye con la temperatura, sin embargo las isotermas son más rectilíneas y con pendientes menores para el O₂ que para el CO₂. (Figura 6).

Por tal razón, el proceso de adsorción-desorción se realiza en dos fases, una con mayor presión que la otra, por lo que es un proceso de adsorción por alternancia de presión (PAAP). Se suele emplear dos co-

lumnas,⁶ para que una esté en la fase de mayor presión (adsorción) mientras la otra está en la de menor presión (desorción).

En años recientes se ha preferido usar un proceso en el que la presión baja es menor que la atmosférica, en este caso se trata de un proceso de adsorción por alternancia de presión y vacío (PAAVP).

Dimensiones y Diseño de las Columnas de Adsorción.

El diseño de las columnas de adsorción y del proceso debe basarse en modelado y simulación numérica para elegir los parámetros óptimos tanto en dimensiones como en tiempos.

Existen varios programas de simulación que son una ayuda clave en este tema al permitir modelado dinámico y simulación de alternativas de diseño y cambios de

⁶ Existen diseños que usan una sola columna de adsorción, o más de una, por lo general en números pares.

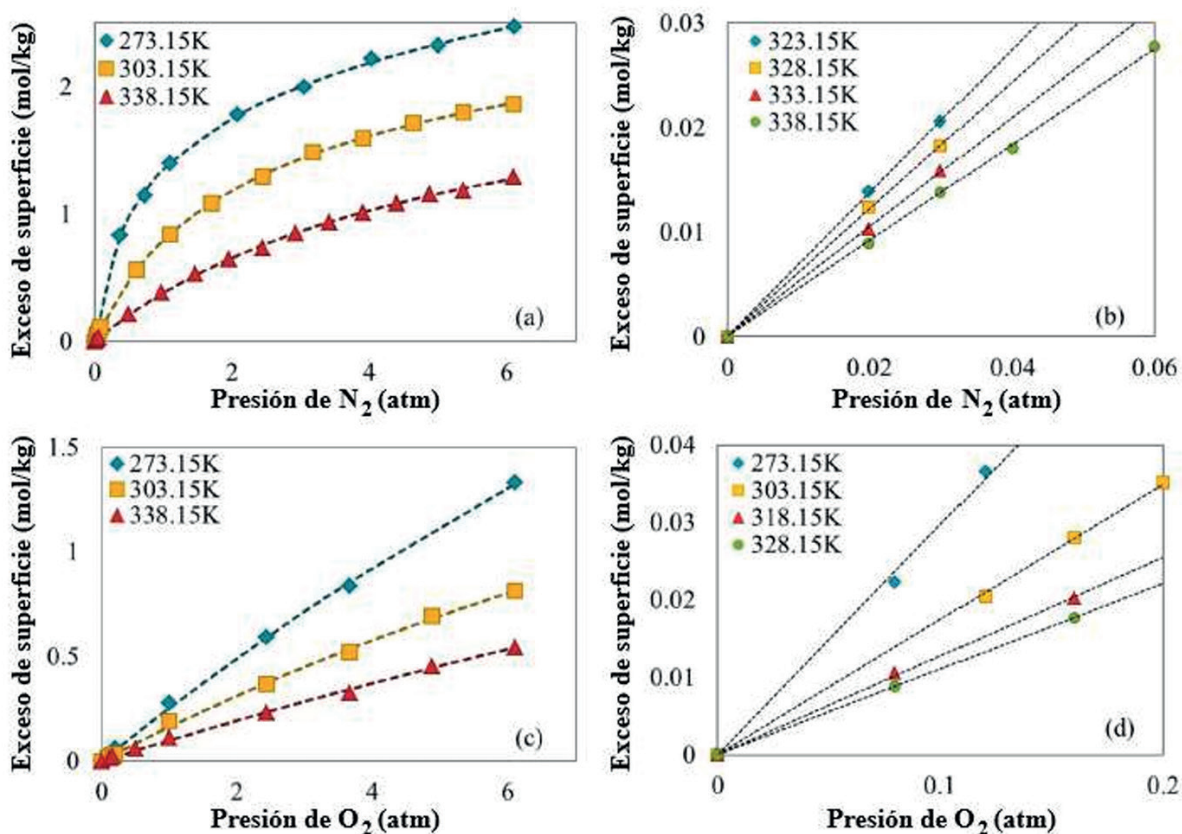


Figura 6. Isotermas de adsorción de N_2 y O_2 en zeolita LiLSX

Del lado derecho: Adsorción, medida como “Exceso de superficie” a presiones entre 0 y 6 atm y tres temperaturas, arriba para el N_2 y abajo para el O_2 .

Del lado derecho: Adsorción a presiones bajas. La adsorción de N_2 disminuye aunque sigue siendo, mayor que la del O_2 .

Del lado izquierdo: Presiones en la región donde es válida la ley de Henry y cuatro temperaturas
Gráficas basadas en (Wu C-W, 2014)

parámetros de operación. Algunas publicaciones reportan desarrollo de diseños poco comunes para la separación de aire en procesos de adsorción, tales como flujo radial, direccionamiento con válvulas giratorias, alternancia rápida de la presión.

El diseño y la construcción del sistema tienen que basarse en:

1. Conocimiento detallado de los procesos de adsorción pertinentes.

2. Uso de programas o plataformas para modelado y simulación numérica y optimización de parámetros.

3. Excelencia en los materiales, manufactura y dispositivos.

En esta etapa de la construcción y prueba de nuestro prototipo, hemos enfrentado problemas cuando no cumplimos estrictamente las normas anteriores.

Usos del Oxígeno Concentrado.

Los segmentos del mercado del oxígeno concentrado son principalmente el **industrial** (más de 70% de la demanda) y el **médico** (más de 20% de la demanda), principalmente en la oxigenoterapia de enfermedades respiratorias crónicas en los hospitales y a largo plazo (a domicilio o durante actividades diversas fuera de casa).

Nichos importantes son: aeroespacial, laboratorios, actividades recreativas o productivas a gran altitud, actividades laborales a mediana altitud (2000 a 4000 msnm).

Nuestro Proyecto

Desde la pandemia 2020 nos propusimos estudiar, diseñar y producir un concentrador de oxígeno para uso médico (COM).

Retos y Decisiones

Estábamos ante un conjunto de retos y decisiones:

1. Tipo de COM.
2. Campo de aplicación.
3. Tamaño.
4. Rendimiento.
5. Costo.
6. Rentabilidad.

Cada uno de ellos es un reto importante y una decisión riesgosa.

Por razones prácticas, comenzamos con un prototipo pequeño pero no miniaturizado. Queremos reunir características que puedan significar ventajas competi-

tivas y que cubran necesidades percibidas. Sabemos que aunque la pandemia estimuló la producción de concentradores de oxígeno de uso médico, no todos los productos en venta cumplen con los requisitos mínimos.

Clientes Potenciales.

Necesitamos conocer mejor a nuestros clientes potenciales y sus requerimientos. ¿Quiénes son nuestros clientes potenciales? Entre ellos, por supuesto, están los siguientes:

- Pacientes respiratorios.
 - Agudos
 - Crónicos (oxigenoterapia a largo plazo)
- Proveedores de servicios de salud.
 - Clínicas pequeñas poblaciones pequeñas.
 - Sector público.
 - Sector privado.
- Familiares de pacientes.
- Proveedores de aparatos médicos.
- Servicios de Gestión de equipos médicos.
- Fabricantes de equipos que incorporen un concentrador de oxígeno.

Proceso de Adsorción por Alternancia de Presión y Vacío (PAAPV)

La Figura 7 muestra un diagrama de bloques que contiene los pasos principales y muestra las seis vías del proceso.

Empleamos dos columnas de adsorción verticales y tres pequeños tanques de almacenamiento: aire comprimido, producto y vacío.

Ciclo

El ciclo de nuestro prototipo es de dos fases: Las fases difieren solamente en cuál de las dos columnas está en producción (adsorción de N_2 para producir O_2 concentrado) y cuál en recuperación (desorción de N_2 y descarga del aire pobre en O_2).

Etapas del Ciclo (Tabla 1):

- a. El extremo superior de ambas columnas está cerrado. Por su extremo inferior: la columna que estará en producción se conecta con, el tanque de aire comprimido hasta que su presiones se igualan (**etapa de presurización**). La columna que estará en recuperación, se abre al aire ambiente (**etapa de descompresión pasiva**).
- b. El extremo superior de la columna en producción, se abre a la vía de producto y el producto se almacena en el tanque respectivo; una válvula de control garantiza que la columna no entregue producto a presión menor a 2 Bar; esto mantiene la presión del proceso a esa misma presión (**etapa de producción inicial**). El extremo superior de columna en recuperación sigue cerrado, y el extremo inferior se conecta a la vía de vacío (**etapa de evacuación**).
- c. El extremo inferior de la columna continúa conectado al aire comprimido, y su extremo superior continúa conectado a la vía de producto (**etapa de producción**); su extremo inferior continúa conectado al aire comprimido. Una electroválvula conecta la vía de producto con la vía de purga, de forma que la mayor parte del producto siga yendo al tanque de producto, mientras una parte menor va, por la la vía de purga, al extremo superior de la columna en

recuperación (**etapa de purga**), si es necesario, se permite que parte de la purga sea con aire ambiente.

- d. El extremo inferior de ambas columnas se cierra al tiempo que se interconectan sus extremos superiores. Esto iguala las presiones y prepara ambas columnas para que, en la siguiente fase (**etapa de ecualización de presiones**). En cada nueva fase, repiten las cuatro etapas, pero las columnas cambian roles.

Vías del flujo (Figura 7)

- **Vía de Aire Comprimido:** El aire ambiente, comprimido por una bomba, se almacena en un pequeño tanque, pasa por filtros de partículas y humedad, y se envía a la columna en fase de producción.
- **Vía de Producto:** El oxígeno concentrado se almacena en un tanque, del cual la mayor parte se usa para administrarlo al paciente. Una parte menor se utiliza para que la columna en fase de recuperación (a presión inferior a la atmosférica) reciba una mezcla pobre en nitrógeno, facilitando así la desorción del N_2 y la recuperación de la capacidad de adsorción del adsorbente.
- **Vía de "Vacío":** Consta de una bomba de vacío que genera una presión de 0.6 Bar por debajo de la presión atmosférica y un tanque que contiene el aire a baja presión. Esta vía aplica esta presión subatmosférica a la columna que entrará en fase de recuperación.
- **Vía de "Purga":** Conduce una parte del producto y una parte del aire ambiente hacia la columna que está conectada a la vía de "vacío".

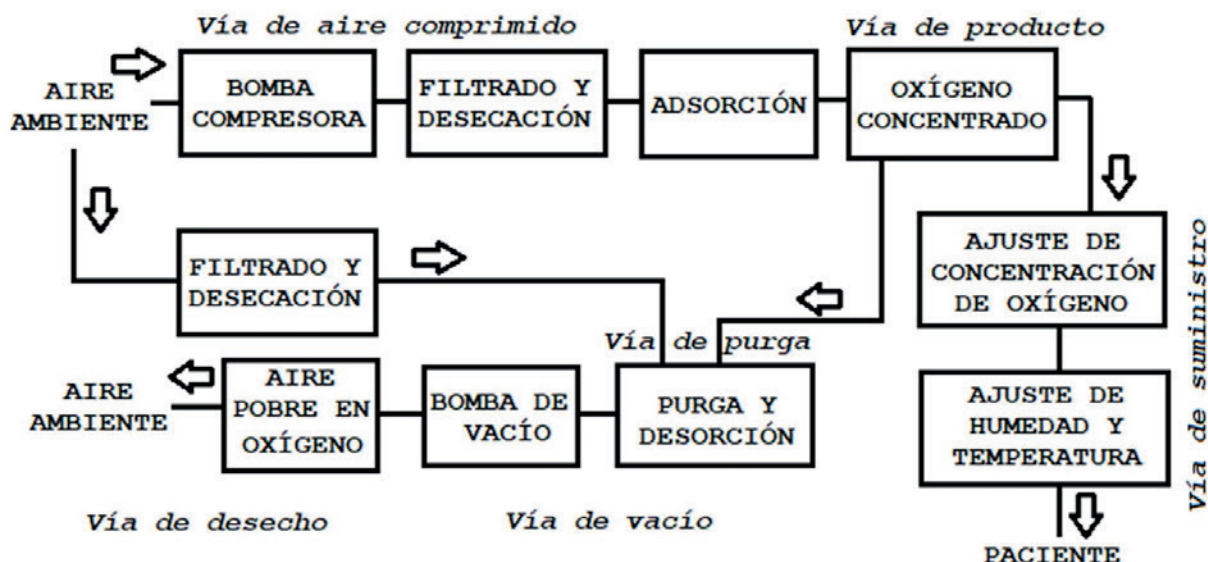


Figura 7. Proceso de adsorción por alternancia de presión y vacío (PAAPV)
(Descripción en el texto)

- **Vía de Suministro:** Conduce la mayor parte del producto hacia el paciente; se ajusta la concentración de oxígeno (menor concentración permite mayor caudal), la humedad y la temperatura, y finalmente el caudal.
- **Vía de Desecho:** Es la vía por la que sale a la atmósfera el aire pobre en oxígeno.

El cierre o apertura de cada vía, la dirección y sentido del flujo de aire se regulan mediante electroválvulas y diferencias de presión.

El aire ambiente pasa por dos filtros: uno de partículas y agua de condensación y otro desecante; bien sea que se dirija a la vía de aire comprimido o a la vía de purga.

En puntos clave, tenemos sensores de presión o de caudal y reguladores de caudal. Una válvula reguladora de presión co-

rriente arriba⁷ regula la presión del proceso de adsorción.

Visión a futuro

Las siguientes son áreas de oportunidad:

1. Colaboración con centros de investigación y educación superior.
2. Colaboración con la industria.
3. Conocimiento del mercado de los concentradores de oxígeno.
4. Planeación estratégica y de negocio.
5. Conocimiento, modelado y optimización del proceso.
6. Pruebas intensivas de laboratorio.
7. Pruebas extensivas de campo de aplicación.

⁷ Se trata de una válvula muy simple pero ideal para este uso. Consiste en un diafragma sujeto a la presión piloto por un lado, y a la presión corriente arriba por el otro (cámara de entrada). Si la presión a la entrada supera a la presión piloto, el diafragma se eleva y permite el paso de la cámara de entrada a la de salida; si la presión descende, el diafragma también descende y bloquea el paso hacia la cámara de salida.

8. Mejores sistemas electrónicos, de control, información y comunicación, en el prototipo y en el dispositivo final.

Conclusiones

Los concentradores de oxígeno de uso médico son esenciales en la atención de enfermedades y condiciones que afectan la función respiratoria, tanto en su fase aguda como crónica.

Los concentradores de oxígeno basados en adsorción de nitrógeno están ocupando un lugar cada vez más importante en todas las aplicaciones donde se requiere de oxígeno concentrado, desde litros por minuto hasta metros cúbicos por hora.

Referencias

Ballester R, P. M. (2012). La lucha europea contra la presencia epidémica de la poliomielitis: una reflexión histórica. *Dymanis*, 32(2), 273. 285. doi:<https://dx.doi.org/10.4321/S021195362012000200001>

Barach, A. (26 de 08 de 1922). The Therapeutic Use of Oxygen. *The Journal of the American Medical Association*, 79(9), 693 - 699. Recuperado el 4 de 09 de 2024, de <https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/9JPKkAw4/>

Heffner, J. (01 de 2013). The Story of Oxygen. *Respiratory Care*, 58(1), 18 - 30. doi:10.4187/respcare.01831

Hurtado DE, A.-R. N. (25 de 06 de 2023). Multiscale modeling of lung mechanics: From alveolar microstructure to pulmonary function. *J Mech Phys Solids*, 179, 1 - 17. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmps.2023.105364>

Mingfei P, H. O. (25 de 07 de 2017). *www.mdpi.com/journal/nanomaterials*. doi:<https://doi.org/10.3390/nano7080195>

[tps://doi.org/10.3390/nano7080195](https://doi.org/10.3390/nano7080195)

Mitra S, S. V. (10 de 05 de 2021). Diffusion of confined fluids in microporous zeolites and clay materials. *Reports on Progress in Physics*, 84(066501), 49 pp. doi:10.1088/1361-6633/abf085

Overweg. (01 de 01 de 1998). The preparation, modification and characterization of some molecular sieve materials. [PhD Thesis 1 (Research TU/e / Graduation TU/e), Chemical Engineering and Chemistry], 1 - 119. Eindhoven, Bravante Septentrional, Países Bajos. doi:<https://doi.org/10.6100/IR515647>

Ross M, W. S. (2023). Oxygdn inequity in the COVID-19 pandemic and beyond. *Glob Health Sci Pract*, 11(1), e2200360 (7 pp). doi:<https://doi.org/10.9745/GHSP-D-22-00360>

Science History Institute. (s.f.). <https://www.sciencehistory.org/>. Recuperado el 25 de 09 de 2024, de <https://www.sciencehistory.org/education/scientific-biographies/arnold-o-beckman/>

Shultz SM, H. P. (2005). George E Holzapple (1862-1946) and Oxygen Therapy for Lobar Pneumonia: The First Reported Case (1877) and Review of the Contemporary Literature to 1899. *Journal of Medical Biography*, 13(4), 201 - 206. doi:10.177/09777200501300405

Wu C-W, K. M. (2014). Equilibrium Adsorption Isotherms of Pure N₂ and O₂ and Their Binary Mixtures on LiLSx Zeolite: Experimental Data and Thermodynamic Analysis. 53, 7195 - 7201. doi:[doi:10.1021/ie500268s](https://doi.org/10.1021/ie500268s)

Reparación de la médula espinal: problemática y estrategias



50A
Casa abierta al tiempo

*Diana María Osorio Londoño
Axayácatl Morales Guadarrama
Yessica Heras Romero
Juan Morales Corona
Roberto Olayo González*

Resumen

La lesión de médula espinal es un problema de salud pública que carece de tratamientos eficaces para conducir a la recuperación completa de los pacientes y por lo tanto múltiples líneas de investigación se nutren de fuentes de nueva información de manera prácticamente constante. Desde la complejidad de su problemática en el desarrollo natural del padecimiento, sus técnicas de análisis en constante actualización y las diversas propuestas de tratamiento desde múltiples enfoques tecnológicos, hoy en día contamos con una gran cantidad de información del contexto actual y las tendencias en estrategias para buscar la recuperación estructural y funcional de este tejido vital para la calidad de vida de las personas. En el presente trabajo abordamos parte de la problemática y las posibles soluciones propuestas.

Palabras clave: Biomateriales; Neuroprotección; Neuroimagen; Ingeniería Tisular

Abstract

Spinal cord injury is a public health problem that lacks effective treatments for the complete recovery of patients. Therefore, multiple lines of research are fed by sources of new information almost constantly. From the complexity of the natural development of the pathology, its analysis techniques that are constantly updated and the various treatment proposals from multiple technological approaches, today we have a large amount of information on the current context and trends in strategies to seek the structural and functional recovery of this vital tissue for the quality of life of people. In this work we address part of the problem, and the possible solutions proposed.

Keywords: Biomaterials; Neuroprotection; Neuroimaging; Tissue Engineering

Introducción

La lesión de médula espinal (LME) constituye una problemática de salud pública a nivel global, debido a que conduce a la pérdida de funciones motoras, sensoriales y autónomas, produciendo altas tasas de discapacidad, complicaciones, gastos en salud y dependencia a largo plazo. Ya sea de origen traumático o no traumático, afecta a la sociedad en todos los grupos etarios, cuyas consecuencias permean todos los aspectos de la vida de los pacientes y sus familiares. Si bien se conoce cada vez más a fondo los complejos efectos de las LME, y la investigación en estrategias para la recuperación de los pacientes que la padecen ha sido ardua y desde diversos frentes, la búsqueda de una cura absoluta continúa vigente. La investigación en esta línea se sigue nutriendo de los avances tecnológicos en áreas como la imagenología médica, neurocirugía, farmacología, ingeniería de tejidos y medicina regenerativa (Alvi et al., 2024).

Lesión de médula espinal

Parte de la problemática de las LME es que son únicas a cada paciente, y abordarlas adecuadamente continúa siendo un reto para el sector de la salud. Las LME no traumáticas (LMEN) son aquellas causadas por tumores, infecciones, enfermedades degenerativas o vasculares que pueden comprimir la médula, ya sea de forma constante y paulatina o desencadenar una reacción inflamatoria severa, produciendo la muerte de las células nerviosas o provocando el desarrollo de un microambiente citotóxico. En el caso de las LMEN, la problemática se origina desde su diagnóstico, para el cual la imagenología médica ha sido fundamental (Ishaque et al., 2024). Estudios empleando técnicas avanzadas de resonancia magnética (RM)

o tomografía computarizada (TC) han contribuido al diagnóstico más preciso y manejo más adecuado de las LMENT, que a la fecha constituyen un desafío clínico.

En nuestro grupo de trabajo hemos implementado técnicas avanzadas de RM como la imagenología por tensor de difusión (DTI) para el estudio de las LMENT, las cuales permiten obtener información cuantitativa acerca de la microestructura del tejido medular de manera no invasiva in vivo (Osorio-Londoño et al., 2024). Utilizando estos datos, podemos realizar reconstrucciones de la arquitectura medular, la organización del tejido, la integridad de los paquetes axonales de la materia blanca y de posibles efectos de la LME, tales como quistes, hemorragia o crecimiento desordenado del tejido. Además, la representación gráfica, o tractografía del DTI (Figura 1) permite generar imágenes en tercera dimensión de los tractos neurales que conforman el tejido, de manera que el análisis de la información sea preciso, y el diagnóstico temprano y eficiente.

Por otro lado, la LME traumática (LMENT) produce una lesión secundaria que, a grandes rasgos, implica fenómenos como la compresión y ruptura de vasos sanguíneos, produciendo la muerte tisular, hemorragia e isquemia y originando el daño de la barrera hematoespinal, con lo cual el ambiente protegido del sistema nervioso central se expone al ingreso de células inmunitarias que desencadenan un proceso inflamatorio que se retroalimenta positivamente sin pasar a una fase antiinflamatoria o regenerativa, como sí sucede en otros tejidos del organismo. Paralelamente, se produce la muerte masiva de neuronas y células gliales tales como los astrocitos y oligodendrocitos, establecién-

dose un microambiente compuesto por desechos celulares que potencian la respuesta proinflamatoria.

Estos fenómenos, que se engloban en el ya conocido daño secundario del sistema nervioso central, además conducen a la reorganización tisular donde las células de soporte denominadas astrocitos cambian su fenotipo convirtiéndose en células reactivas que buscan contener el daño y así evitar que éste se extienda (Grijalva-Otero y Doncel-Pérez, 2024). Estos astrocitos *reactivos* se combinan con las células proinflamatorias y producen moléculas de la matriz extracelular para constituir una barrera tisular que separa el tejido sano del dañado, que de acuerdo con la magnitud de la lesión puede extenderse a la totalidad de la superficie transversal de la médula, como se muestra en la Figura 1.

Dentro de esta barrera, conocida como *cicatriz glial*, se constituye un tejido inhibitorio para la regeneración, ya que a pesar de que los axones tienen la capacidad de buscar formar nuevas conexiones funcionales, la composición fisicoquímica de la cicatriz glial restringe la propagación de los axones. Estudios en pacientes con LME crónica después de décadas transcurridas tras el daño inicial, o lesión primaria, muestran que las consecuencias de la LME persisten en forma de cicatriz glial crónica.

Como consecuencia, la LME conlleva la pérdida de capacidad motora y sensorial, control de esfínteres, atrofia de los músculos, dolor *neuropático*, debido a circuitos neuronales disfuncionales, desregulación del sistema nervioso autónomo, e incluso procesos a niveles superiores como depresión.

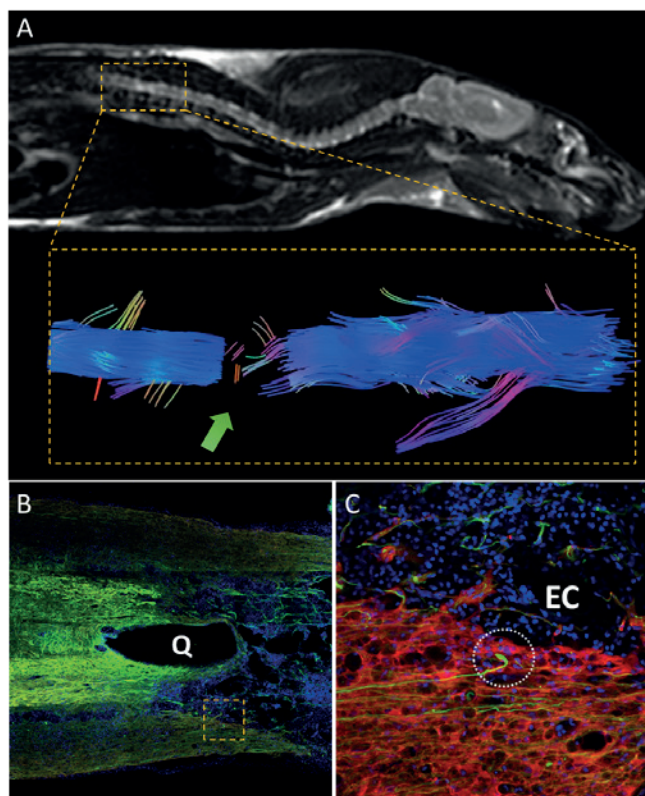


Figura 1. Estudio de la LME por técnicas de imagen e histología en modelo animal. En A, imagen anatómica de resonancia magnética y acercamiento a la microestructura del epicentro (EC) de la lesión (flecha), obtenida por tractografía. En B, imagen de microscopía confocal de médula lesionada que muestra un gran quiste (Q). Los núcleos celulares se marcan en azul (DAPI), las neuronas en rojo (MAP2) y los axones en verde (β -3 Tubulina). En C se señala un microtúbulo esquivando zona del EC. C es el acercamiento al recuadro marcado en B.

Manejo de la LME en pacientes

Actualmente, la intervención quirúrgica es la estrategia más eficaz para mitigar los efectos secundarios de la LMET y reducir la mortalidad asociada (Grijalva-Otero y Doncel-Pérez, 2024), ya que se limita la magnitud del daño primario y se restringe su extensión, con lo cual se pueden preservar áreas de tejido funcional que además da lugar a procesos de plasticidad neuronal. Esta plasticidad es una de las formas en que el tejido preservado forma nuevas conexiones para mantener la funcionalidad del tejido controlado por áreas de la médula que se encuentran dañadas.

La descompresión quirúrgica, un procedimiento invasivo por el cual se libera la médula de posibles restos de hueso o edema que la comprimen, acentuando los efectos del daño secundario como isquemia, ha demostrado ser un procedimiento seguro, que brinda la posibilidad de aplicar tratamientos alternativos como el implante de andamios para el soporte de crecimiento tisular, liberación controlada y focalizada de fármacos o factores de crecimiento, al tiempo que se eliminan sustancias tóxicas derivadas de la LME.

No obstante, la intervención quirúrgica, en especial durante la ventana terapéutica

óptima sigue presentando obstáculos tales como los protocolos de manejo establecidos del hospital de ingreso, demoras en el acceso al procedimiento, acceso directo a hospitales especializados con personal e instalaciones idóneas para llevarlo a cabo o las posibles complicaciones asociadas (Pedro et al., 2024).

Por otro lado, la aplicación de estrategias farmacológicas para buscar la neuroprotección ante los efectos de la lesión secundaria continúan en debate, ya sea por falta de evidencia respecto a su efecto terapéutico o las complicaciones asociadas (Zeller et al., 2024). La metilprednisolona se ha utilizado desde hace décadas con el fin de mitigar la abrumadora respuesta inflamatoria que forma parte del daño secundario. Sin embargo, diversos estudios en pacientes mostraron evidencia contradictoria respecto a su potencia terapéutica, así como complicaciones como hemorragia gastrointestinal, sepsis, neumonía, y cicatrización prolongada de heridas. Además, no se ha encontrado evidencia significativa respecto a sus efectos positivos en la recuperación funcional de los pacientes a largo plazo.

Otro fármaco que se encuentra en investigación por sus efectos neuroprotectores es el riluzol, un medicamento que se aplica en pacientes con esclerosis lateral amiotrófica (ELA). Su efecto neuroprotector se enfoca en la acción inhibidora de la liberación de glutamato, un conocido neurotransmisor que en el caso de ELA o LMET se encuentra en exceso, conduciendo a la muerte de las neuronas por su actividad citotóxica. Entre los efectos adversos asociados con su aplicación se encuentra la depresión respiratoria que puede aumentar el riesgo de muerte en pacientes con LME y por lo tanto aún no se llega a un consenso respecto a su beneficio clínico.

Por otro lado, la rehabilitación física (RF) es la única terapia globalmente aceptada a nivel clínico para los pacientes con LME. Esta terapia promueve procesos como la plasticidad neuronal, que consiste en la reorganización de los circuitos neuronales para el mantenimiento de conexiones funcionales que se reflejan en la capacidad motora, sensorial y autónoma. Adicionalmente, la investigación sobre el microambiente tisular que produce la RF se relaciona con señales bioquímicas que promueven procesos tales como regeneración, diferenciación, supervivencia, proliferación, síntesis de proteínas y factores de crecimiento (Grijalva-Otero y Doncel-Pérez, 2024).

Nuevas propuestas

Actualmente, se sabe que los tratamientos más prometedores consisten en abordar el problema mediante estrategias compuestas. Por un lado, se busca utilizar sustratos cuyas propiedades mecánicas favorezcan la migración celular, tales como andamios fibrilares y geles que mimeticen la estructura de la matriz extracelular y constituyan un soporte estructural que guíe el crecimiento tisular (Zhang et al., 2024), como se muestra esquemáticamente en la Figura 2.

Además, estos biomateriales se pueden adicionar con diversos medicamentos, que al ser liberados paulatinamente, potencian su actividad terapéutica a nivel específico y local (Yang et al., 2024).

La explosión de la terapia celular también ha impactado la línea de investigación en estrategias terapéuticas para la LME. Desde la aplicación de células madre inducidas (iPSCs) autólogas, hasta células madre de tejidos alogénicos (MSCs, hUMSCs), derivadas de placenta o cordón umbilical, hoy existe una gran

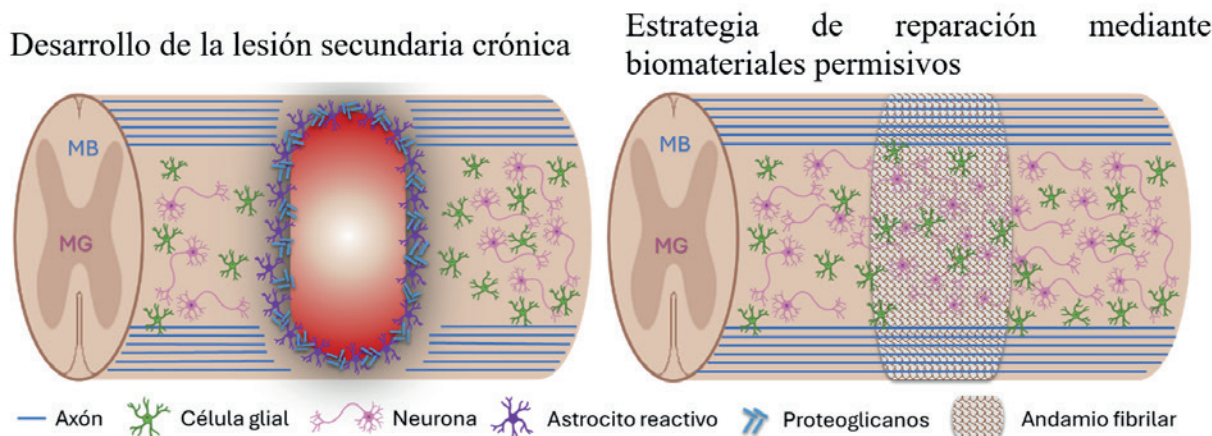


Figura 2. Lesión completa de médula espinal y estrategia propuesta de tratamiento.

cantidad de trabajos que reportan el uso de células en combinación con biomateriales para sustituir el tejido medular perdido y potenciar su recuperación funcional (Ralph et al., 2024).

Otra de las estrategias más prometedoras implica la aplicación de exosomas o vesículas extracelulares, pequeños paquetes de moléculas que son producidos por las células y potencian la neuroprotección (Heras-Romero et al., 2021), ya que modulan los efectos adversos de la lesión secundaria, promueven la formación de vasos sanguíneos, la formación de nuevas neuronas, entre otros fenómenos, que se reflejan en la recuperación funcional (Li et al., 2024). Estos exosomas presentan las características fisicoquímicas y morfológicas para atravesar la barrera hematoespinal y acceder a la zona de la lesión para ejercer su actividad terapéutica.

Además, los exosomas pueden combinarse con otras estrategias terapéuticas como los biomateriales, células madre, medicamentos y factores de crecimiento (Alvi et al., 2024), brindando estrategias combinadas y potenciando su efectividad (Figura 3).

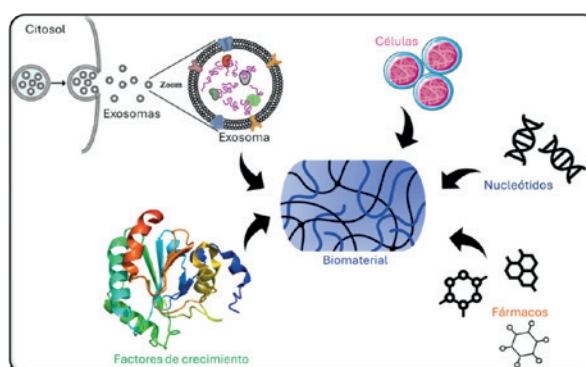


Figura 3. Nuevas propuestas de tratamiento en investigación.

Propuesta experimental basada en andamios fibrilares neuroprotectores

Parte de las propuestas que se han hecho desde nuestro grupo de trabajo, es el uso de andamios compuestos de fibras de políácido láctico (PLA), un polímero biodegradable y biocompatible que constituya un soporte estructural para el crecimiento tisular. Con el fin de modificar el ambiente inhibitorio propio del epicentro (EC) de la LME, las fibras de PLA se recubren con polímero de pirrol dopado con yodo sintetizado por plasma (pPPy-I), un biomaterial que tiene una alta afinidad con factores de crecimiento, la matriz extracelular y las células (Islas-Arteaga et al., 2019; Serra-

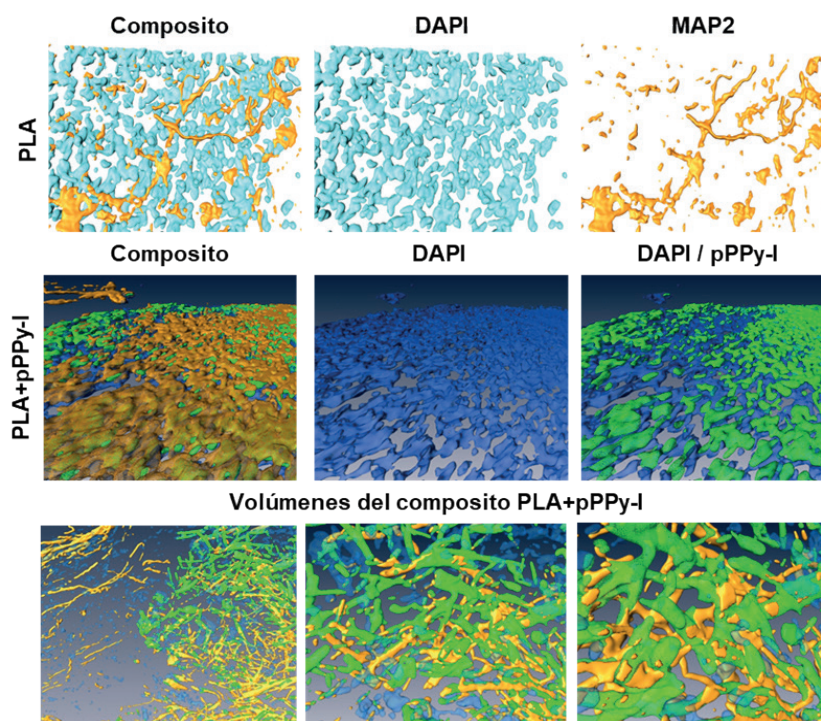


Figura 4. Reconstrucción tridimensional del epicentro de la lesión tratada con andamios neuroprotectores de PLA+pPPy-I. En contraste con el andamio de PLA donde se observan escasas prolongaciones nerviosas (MAP2), en el compuesto de PLA+pPPy-I se detecta crecimiento de tejido nervioso (MAP2 y DAPI) a través del epicentro de la lesión.

tos et al., 2019). Además, presenta conductividad eléctrica y promueve la neuroprotección, ya que modula los efectos del daño secundario, tales como exceso de radicales libres (Coyoy-Salgado et al., 2023).

Como prueba de concepto, realizamos un modelo de LME por sección completa en animales de laboratorio e implantamos los andamios de PLA+pPPy-I entre los dos segmentos de médula espinal completamente cortadas (Osorio-Londoño et al., 2024). Tras ocho semanas de estudio observamos una recuperación significativa de los animales y un crecimiento tisular a través de los andamios (Figura 4).

Por otro lado, la terapia combinada del pPPy-I con rehabilitación física (RF) ha

señalado una clara ventaja respecto a la sola terapia de RF, tanto a nivel funcional como estructural (Sánchez-Torres et al., 2020). Estudios en animales de laboratorio con LMET han demostrado la expresión de genes asociados con procesos de desarrollo de tejido nuevo, sinapsis entre neuronas y tráfico de vesículas sinápticas, proliferación y desarrollo celular, diferenciación celular, después de 4 semanas de tratamiento (Coyoy-Salgado et al., 2023).

Aunque existe mucho trabajo por realizar aún, estos resultados muestran el gran potencial de las estrategias de tratamiento que se están estudiando actualmente, para llevar alternativas de tratamiento a los pacientes hacia una recuperación completa tras una LME.

Conclusiones

La lesión medular traumática y no traumática presenta un desafío de gran complejidad fisiopatológica. Los avances tecnológicos en neuroimagenología, ingeniería de tejidos y medicina regenerativa presentan propuestas novedosas cuyo principio terapéutico se basa en los distintos fenómenos implicados en los efectos secundarios de la lesión medular, constituyendo alternativas prometedoras para la recuperación de los pacientes.

Agradecimientos

Al Dr. Luis B. Tovar y Romo, la Dra. Laura Álvarez y la Dra. Araceli Diaz-Ruiz; al Centro Nacional de Investigación en Imagenología e Instrumentación Médica (CI3M); al Instituto de Fisiología Celular (IFC-UNAM) y al Laboratorio de Microscopía Confocal de la UAM-I por su invaluable apoyo en esta investigación. A la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación (SECTEI), a través del proyecto de Consorcio UAM- IPN-SECTEI “Desarrollo numérico experimental de lesión de médula espinal implantada con polímero derivado del pirrol mediante DTI y MRS en murinos.

Referencias

Alvi MA, Pedro KM, Quddusi AI, Fehlings MG. Advances and Challenges in Spinal Cord Injury Treatments. *J Clin Med* 2024;13:1–24. <https://doi.org/10.3390/jcm13144101>.

Coyoy-Salgado A, Orozco-Barrios C, Sánchez-Torres S, Olayo MG, Cruz GJ, Morales-Corona J, et al. Gene expression and locomotor recovery in adult rats with spinal cord injury and plasma-synthesized polypyrrole/iodine application combined with a mixed rehabilitation scheme.

Front Neurol 2023;14:1124245. <https://doi.org/10.3389/fneur.2023.1124245>.

David G, Mohammadi S, Martin AR, Cohen-Adad J, Weiskopf N, Thompson A, et al. Traumatic and nontraumatic spinal cord injury: pathological insights from neuroimaging. *Nat Rev Neurol* 2019;15:718–31. <https://doi.org/10.1038/s41582-019-0270-5>.

Grijalva-Otero I, Doncel-Pérez E. Traumatic Human Spinal Cord Injury: Are Single Treatments Enough to Solve the Problem? *Arch Med Res* 2024;55. <https://doi.org/10.1016/j.arcmed.2023.102935>.

Heras-Romero Y, Morales-Guadarrama A, Santana-Martínez R, Ponce I, Rincón-Heredia R, Poot-Hernández AC, et al. Improved post-stroke spontaneous recovery by astrocytic extracellular vesicles. *Mol Ther* 2021;30:1–18. <https://doi.org/10.1016/j.ymthe.2021.09.023>.

Ishaque AH, Alvi MA, Pedro K, Fehlings MG. Imaging protocols for non-traumatic spinal cord injury: current state of the art and future directions. *Expert Rev Neurother* 2024;24:691–709. <https://doi.org/10.1080/14737175.2024.2363839>.

Islas-Arteaga NC, Raya Rivera A, Esquiliano Rendon DR, Morales-Corona J, Ontiveros-Nevares PG, Flores Sánchez MG, et al. Electrospun scaffolds with surfaces modified by plasma for regeneration of articular cartilage tissue: a pilot study in rabbit. *Int J Polym Mater Polym Biomater* 2019;68:1089–98. <https://doi.org/10.1080/0914037.2018.1534109>.

Li Y, Luo W, Meng C, Shi K, Gu R, Cui S. Exosomes as promising bioactive materials in the treatment of spinal cord injury.

Stem Cell Res Ther 2024;15:335. <https://doi.org/10.1186/s13287-024-03952-5>.

Osorio-Londoño D, Heras-Romero Y, To-var-y-Romo LB, Olayo-González R, Morales-Guadarrama A. Improved Recovery of Complete Spinal Cord Transection by a Plasma-Modified Fibrillar Scaffold. *Polymers (Basel)* 2024;16. <https://doi.org/10.3390/polym16081133>.

Pedro KM, Alvi MA, Fehlings MG. Obstacles in “Time to Spine”: Challenges for the Timely Delivery of Acute Surgical Care for Patients with Traumatic and Non-Traumatic Spinal Cord Injury. *Healthcare* 2024;12:2222. <https://doi.org/10.3390/healthcare12222222>.

Ralph PC, Choi SW, Baek MJ, Lee SJ. Regenerative medicine approaches for the treatment of spinal cord injuries: Progress and challenges. *Acta Biomater* 2024;189:57–72. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2024.10.021>.

Sánchez-Torres S, Díaz-Ruiz A, Ríos C, Olayo MG, Cruz GJ, Olayo R, et al. Recovery of motor function after traumatic spinal cord injury by using plasma-synthesized

polypyrrole/iodine application in combination with a mixed rehabilitation scheme. *J Mater Sci Mater Med* 2020;31. <https://doi.org/10.1007/s10856-020-06395-5>.

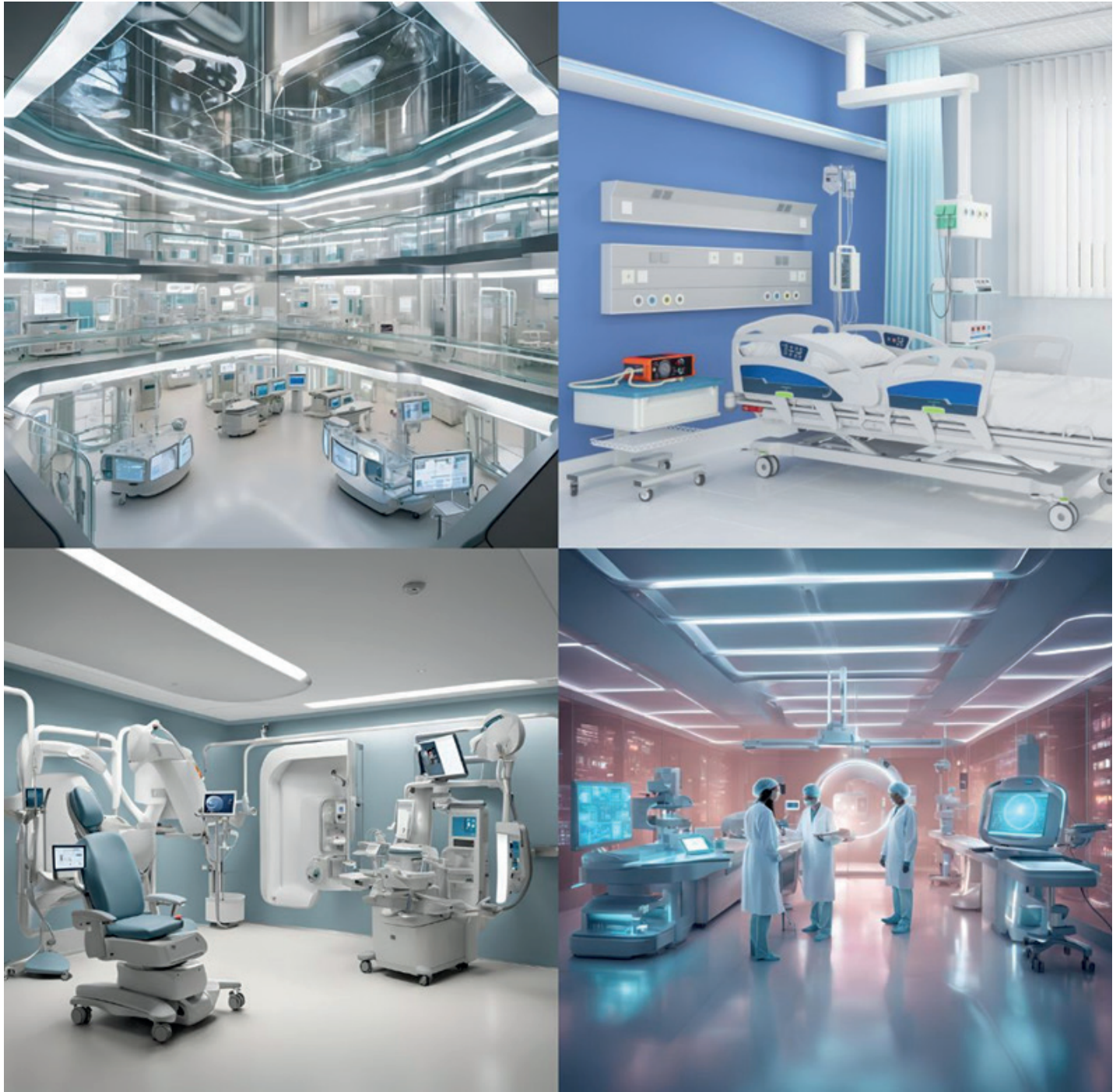
Serratos IN, Olayo R, Millán-Pacheco C, Morales-Corona J, Vicente-Escobar JO, Soto-Estrada AM, et al. Modeling integrin and plasma-polymerized pyrrole interactions: chemical diversity relevance for cell regeneration. *Sci Rep* 2019;9:1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43286-4>.

Yang J, Jin H, Tang C, Liu L. Nanomaterials for the treatment of spinal cord injury. *Appl Mater Today* 2024;38:102193. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2024.102193>.

Zeller SL, Stein A, Frid I, Carpenter AB, Soldozy S, Rawanduzay C, et al. Critical Care of Spinal Cord Injury. *Curr Neurol Neurosci Rep* 2024;24:355–63. <https://doi.org/10.1007/s11910-024-01357-8>.

Zhang N, Hu J, Liu W, Cai W, Xu Y, Wang X, et al. Advances in Novel Biomaterial-Based Strategies for Spinal Cord Injury Treatment. *Mol Pharm* 2024. <https://doi.org/10.1021/acs.molpharmaceut.3c01104>.

Healthcare 5.0: Oportunidades para la Ingeniería Clínica



La integración de tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial (IA), el internet de las cosas médicas (IoTm), la robótica, la realidad virtual, la realidad aumentada y la analítica de datos, está marcando un cambio en la prestación de servicios de salud. En este entorno se busca mejorar la eficiencia de los servicios sanitarios con un énfasis en la personalización de la atención al paciente y promoviendo un enfoque más humano y centrado en el bienestar de las personas. Este paradigma se le denomina “Healthcare 5.0” y para la ingeniería clínica significa una oportunidad para consolidar su papel como puente entre la tecnología innovadora y su implementación efectiva en las instituciones de salud.

La quinta Revolución en los sistemas de atención médica, también denominada Healthcare 5.0, se caracteriza por la adopción de tecnologías digitales avanzadas y conectadas. Es un análogo al concepto de Industria 5.0, la cual se centra en la colaboración con las máquinas con un énfasis en la sostenibilidad y resiliencia. Entre sus elementos clave se encuentran los siguientes:

- **Conectividad total:** a través de la integración de dispositivos médicos inteligentes por medio de redes de interconectividad, se permite desarrollar funciones como el monitoreo remoto de los pacientes en tiempo real.
- **Atención personalizada:** el uso de datos masivos, o Big Data, y algoritmos de IA, fomenta el desarrollo de tratamientos específicos para cada paciente, sentando las bases de la medicina de precisión.
- **Interacción humano-máquina:** con el desarrollo de robots colaborativos en funciones como cirugía, rehabilitación

y diagnóstico, se ha dado un paso hacia la optimización y acceso de los recursos, así como hacia la realidad aumentada para efectos de capacitación y asistencia médica.

- **Enfoque preventivo y predictivo:** a partir de los análisis realizados a los datos en tiempo real, es posible desarrollar modelos de predicción de enfermedades y de complicaciones en las mismas. El aprendizaje automático permite implementar sistemas de alerta temprana como apoyo al diagnóstico y tratamiento.
- **Ética y sostenibilidad:** se generan principios que se fundamenta en el uso de las tecnologías para la mejora en la calidad de vida de las personas, así como la reducción del impacto ambiental por parte de los sistemas de salud.

Oportunidades para la Ingeniería Clínica en Healthcare 5.0

La gestión de las tecnologías es una de las funciones más importantes de los ingenieros clínicos (IC) dentro de las organizaciones de salud. La transición hacia el Healthcare 5.0 amplía las oportunidades de desarrollo de los ingenieros clínicos y les presenta una serie de retos principalmente relacionados con la integración de tecnologías, la efectividad de su capacidad operativa, la seguridad en el manejo de datos e información y la efectividad con respecto a los resultados clínicos. Algunas de las oportunidades más significativas se presentan a continuación:

- **Gestión del Internet de las Cosas Médicas (IoTm):** los desarrollos tecnológicos basados en la conectividad y el internet permiten que dispositivos inteligentes recopilen datos y los analicen en tiem-

po real. Equipos como los monitores de signos vitales, bombas de infusión y los dispositivos portátiles, derivarán información de apoyo a la toma de decisiones para los tratamientos de los pacientes. Las funciones del IC se enfocarán en la implementación y mantenimiento de las redes IoT a través de protocolos de seguridad y confiabilidad, la integración de dispositivos IoTm con los sistemas de gestión de la información como el expediente clínico electrónico, y el aseguramiento de la interoperabilidad entre los diferentes equipos.

- Implementación de la Inteligencia Artificial (IA) en diagnóstico y tratamiento: el análisis de grandes volúmenes de datos para la optimización del diagnóstico y la predicción de los resultados clínicos es una realidad. El IC participará en proyectos colaborando con desarrolladores de IA para adaptar soluciones a los requerimientos hospitalarios, validará la seguridad y precisión de sistemas basados en IA, y diseñará protocolos para el uso ético de la IA en entornos clínicos.
- Desarrollo de infraestructura para sistemas robóticos: el uso de robots para funciones como la cirugía asistida, rehabilitación y logística permite eficientar los servicios, así como darle mayor acceso a la población. La supervisión de la instalación y calibración de los robots de asistencia quirúrgica, el mantenimiento preventivo y correctivo de los sistemas robóticos, y la capacitación al personal médico en su uso seguro serán funciones del IC en este entorno.
- Diseño y desarrollo de soluciones de realidad aumentada y realidad virtual:

estas herramientas son muy útiles en la formación de recursos humanos, la planeación quirúrgica y la terapia de rehabilitación. Las funciones del IC se enfocarán en la selección y evaluación de las mejores tecnologías para los hospitales, el diseño de sistemas de integración entre los software y los dispositivos médicos, y la supervisión en la implementación de simuladores de realidad virtual para capacitación médica.

- Gestión de datos masivos y analítica avanzada: La toma de decisiones se favorece al contar con herramientas que permitan gestionar grandes cantidades de datos y provean métodos avanzados de análisis. El IC puede participar en la implementación de plataformas analíticas para consolidar la gestión de los datos recopilados de los dispositivos médicos y su integración con el expediente electrónico del paciente, el desarrollo de protocolos y mecanismos para garantizar la seguridad y confidencialidad de los datos médicos, y colaborar con equipos multidisciplinarios para interpretar los resultados de los análisis.
- Diseño y gestión de hospitales inteligentes: el entorno en el que el Healthcare 5.0 trabajará será el de los hospitales inteligentes. Estos tendrán los elementos para la completa integración de las tecnologías digitales para la automatización de procesos y, en última instancia, mejorar los servicios de salud. Las oportunidades para el IC se centran en el diseño de sistemas inteligentes de monitoreo y control para equipos médicos, la automatización en áreas logísticas de apoyo en los hospitales, y la supervisión de la implementación de tecnologías sostenibles.

- Ciberseguridad en dispositivos médicos: la conectividad de dispositivos y sistemas ofrece retos importantes con respecto a la integridad y seguridad de la información que se gestiona. Los ataques que vulneran dichos sistemas se multiplican y demandan una mayor atención a esta función, ahora prioritaria en el contexto digital. El papel del IC es estratégico, ya que se encargará de implementar medidas de ciberseguridad en los dispositivos médicos conectados, realizar auditorías de manera periódica para identificar vulnerabilidades en los sistemas, y diseñar protocolos para responder a incidentes de seguridad.

Algunos ejemplos específicos de las funciones del IC dentro del paradigma Healthcare 5.0 son:

- o Configuración de sistemas de monitoreo remoto para pacientes con enfermedades crónicas.
- o Implementación de sistemas de IA para la detección temprana de enfermedades como el cáncer mediante análisis de imágenes.
- o Implementación de robots quirúrgicos como el Da Vinci, que permite realizar procedimientos mínimamente invasivos con mayor precisión.
- o Uso de realidad aumentada en la planificación de cirugías complejas mediante la visualización en 3D de estructuras anatómicas.
- o Análisis de datos para identificar tendencias en la aparición de infecciones hospitalarias.

- o Implementación de sistemas de seguimiento automático de pacientes mediante sensores conectados.
- o Protección de marcapasos conectados contra posibles ataques cibernéticos.

El paradigma 5.0 tiene un fuerte componente en la colaboración y la integración de equipos de trabajo, humanos y no humanos, para la consecución de los objetivos. En este sentido, el IC enfrenta una serie de retos que tendrá que sortear para garantizar el éxito en los emprendimientos digitales en los hospitales. La interoperabilidad es uno de los más inmediatos, ya que se debe garantizar la comunicación entre equipos médicos de diferente origen. La inversión para la adquisición y gestión de tecnologías avanzadas es una barrera importante ante los limitados presupuestos. El uso responsable de plataformas y herramientas basadas en IA debe ser prioritario, ya que implica aspectos de privacidad y derechos de los pacientes. La capacitación en el uso de tecnologías emergentes se vuelve también un elemento relevante para obtener resultados positivos en la implementación y manejo de los entornos digitales e inteligentes.

Este último punto es crítico para el IC, puesto que altera en gran modo la formación tradicional que la ingeniería clínica ha tenido. La velocidad en la evolución de las tecnologías genera una dinámica en la que, además de los conocimientos actuales, se tendrán que aprender nuevos temas y herramientas en un camino de no retorno. En descargo del paradigma 5.0, el énfasis colaborativo permitirá una integración con un impacto controlado para el IC, pero es necesario que se aprendan habilidades adicionales a las de un ingeniero:

- Comprensión profunda de las necesidades del entorno, no solamente las clínicas. Dada la interrelación entre los sistemas dentro del hospital, la complejidad de los problemas demandará una aproximación de mayor integración.
- Habilidades para el diseño y desarrollo de dispositivos médicos orientados al contexto. En atención al punto anterior, el contexto proporcionará elementos de valor para la propuesta de soluciones tecnológicas.
- Gestión de proyectos, como un proceso continuo, basado en el paciente. Dado el protagonismo que el paciente tiene en el paradigma 5.0, los proyectos relacionados con la tecnología deben considerarlo para el desarrollo de proyectos dentro del hospital.
- Fortalecimiento de la colaboración interdisciplinaria, tanto con los actores actuales como con los que se van integrando, en particular con los expertos en tecnologías de la información.
- Conocimiento en profundidad de la parte regulatoria y ética en el contexto 5.0. Dada su naturaleza, ambos aspectos deben estar presentes en todas las acciones dentro del hospital.

Healthcare 5.0 representa una oportunidad única para que la ingeniería clínica

lidere la transformación del sistema de salud, integrando tecnologías avanzadas de manera eficiente y segura. Los ingenieros clínicos desempeñarán un papel vital como facilitadores de esta evolución, asegurando que las innovaciones tecnológicas cumplan con las expectativas clínicas, financieras y éticas. Con un enfoque en la personalización, la sostenibilidad y la conectividad, Healthcare 5.0 no solo mejorará los resultados de los pacientes, sino que también redefinirá el papel de la tecnología en la atención médica, con los ingenieros clínicos como protagonistas del cambio. El costo de este papel actualizado para el IC no es menor, habrá que trabajar de manera importante en comprender y manejar apropiadamente los elementos digitales, inteligentes y su integración en el ámbito médico, pero la naturaleza de su trabajo permitirá facilitar su incursión de manera positiva.

Referencias:

- Gomathi, L., Mishra, A. K., & Tyagi, A. K. (2023, April). Industry 5.0 for Healthcare 5.0: Opportunities, Challenges and Future Research Possibilities. In *2023 7th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)* (pp. 204-213). IEEE.
- Mbunge, E., Muchemwa, B., Jiyane, S., & Batani, J. (2021). Sensors and healthcare 5.0: transformative shift in virtual care through emerging digital health technologies, *Glob. Health J* (2021). J. GLOHJ, 8.

**Mindray— Un servicio
más cercano y una mejor
atención médica para todos**



**Fernando Liu
Jillian Li**

Shenzhen Mindray Bio-Medical Electronics Co., Ltd.



Mindray es una empresa líder mundial en diseño, desarrollo y fabricación de dispositivos y soluciones médicas, dedicada a hacer que una mejor atención médica sea más accesible para la humanidad.

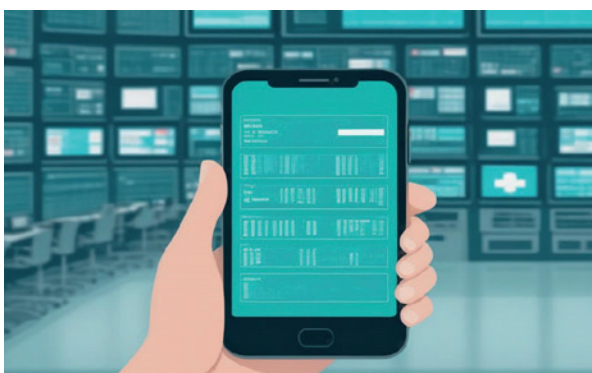
Desde su fundación en 1991, Mindray se ha centrado exclusivamente en la industria médica en los campos de la monito-

rización de pacientes y el soporte vital, el diagnóstico in vitro y las imágenes médicas. Con sede en Shenzhen, China, Mindray es una corporación multinacional con filiales en casi 40 países de América del Norte y del Sur, Europa, África y la región de Asia-Pacífico. Sus productos y servicios están disponibles en más de 190 países.



Basado en la plataforma líder informatizada, digitalizada e inteligente, Mindray es capaz de rastrear las actualizaciones de servicio en tiempo real, responder rápidamente a las necesidades de los usuarios y proporcionar servicios estandarizados de alta calidad para salvaguardar todo el ciclo de vida de los dispositivos.

Hoy en día, el diseño de Mindray en el campo de la (inteligencia artificial) IA ha formado un ecosistema de inteligencia digital médica con "equipo + TI (tecnologías de la información) + IA" como núcleo, y su sistema de IA cubre toda la cadena de aplicaciones, desde dispositivos inteligentes hasta diagnósticos y tratamientos críticos, mejorando significativamente la eficiencia y la precisión médicas.



El sistema de IA de Mindray tiene poderosas ventajas en múltiples escenarios de aplicación. Por ejemplo, la IA se utiliza para potenciar los equipos médicos y realizar la actualización integral de los equipos inteligentes. Hace 10 años, los monitores, los equipos de ultrasonido y los lectores de glóbulos de Mindray lanzados desde 2015 estaban equipados con funciones de IA. Por ejemplo, la máquina de lectura de células sanguíneas utiliza algoritmos de aprendizaje profundo para acortar el tiempo promedio de lectura de los médicos de 25-30

minutos a 30 segundos, con una tasa de precisión del 95%, lo que resuelve el problema de la baja tasa de examen microscópico tradicional. También está la tecnología Ultherapy de Mindray. Utilizando el cuchillo ultrasónico inteligente combinado con la tecnología de detección de tejido inteligente, la recopilación en tiempo real de señales de corte de tejido y la regulación de la producción de energía se realizan por completo, reduciendo el riesgo de quemaduras y mejorando la seguridad de la cirugía.



Otro ejemplo es el modelo de enfermedad grave "Qiyuan" de Mindray, que acaba de publicarse a nivel mundial. Sus funciones principales se desarrollan conjuntamente con Tencent, y el modelo de enfermedad grave "Qiyuan" tiene cuatro funciones principales: 1) respuesta rápida a la enfermedad (integrando los datos del curso completo del paciente en 5 segundos); 2) Redacción de historias clínicas (1 minuto para generar historias clínicas estandarizadas); 3) generación de recomendaciones de diagnóstico y tratamiento (tasa de precisión del 95%); 4) Recuperación de conocimientos sobre enfermedades críticas. Por ejemplo, el sistema puede predecir las tendencias de las enfermedades basándose en los datos de los pacientes en tiempo real para ayudar a los médicos a tomar decisiones rápidas. El modelo de enfermedad grave "Qiyuan"

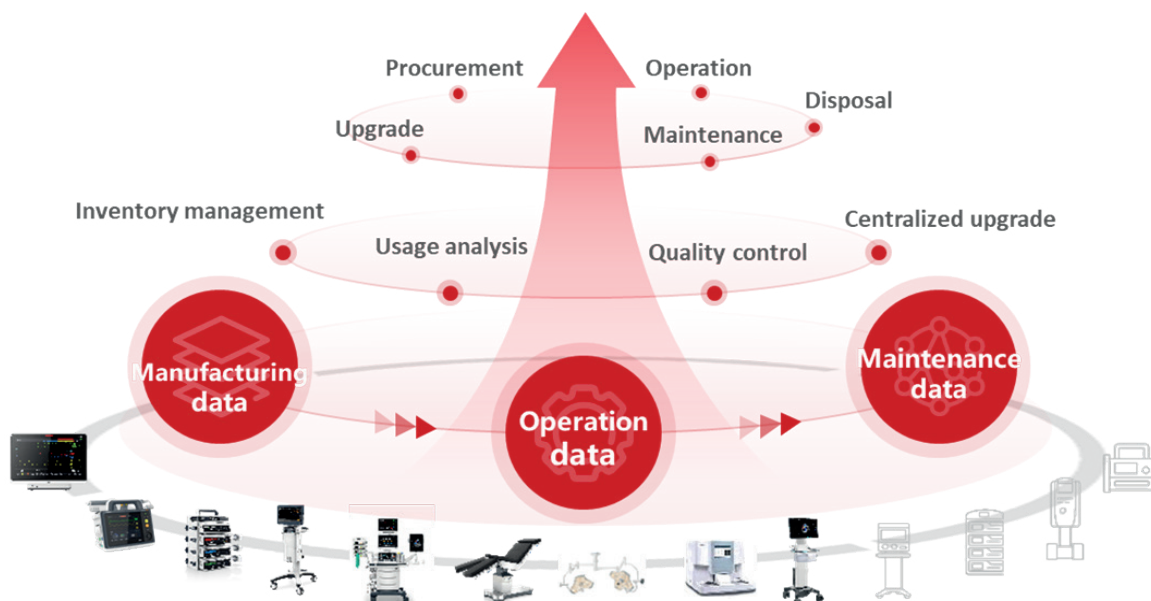


de Mindray tiene importantes ventajas técnicas. Basado en el modelo híbrido de Tencent (billones de parámetros) y la base de datos crítica de Mindray (fusión de datos multimodal), realiza una implementación localizada a través de la tecnología de compresión de modelos para garantizar la privacidad de los datos y reducir los requisitos de potencia informática.

La "IA+TI+Solution" de Mindray puede servir y aplicarse mejor a escenarios clínicos diversificados. Por ejemplo, la Unidad de Cuidados Intensivos (UCI). Debido al gran flujo de datos y a los requisitos de alta puntualidad de la UCI, el modelo grande de Qiyuan genera un retrato digital del paciente mediante la integración de datos de múltiples fuentes, como signos vitales e imágenes, lo que ayuda a los médicos a procesar rápidamente información compleja. Por ejemplo, el Primer Hospital Afiliado de la Facultad de Medicina de la Universidad de Zhejiang utiliza el modelo Qiyuan para

optimizar el proceso de diagnóstico y tratamiento y reducir la presión sobre el personal médico para escribir la documentación. Además, la "IA+TI+Solution" de Mindray también puede ayudar a la innovación y el desarrollo colaborativos multidisciplinarios. Por ejemplo, el sistema de IA de Mindray puede respaldar consultas multidisciplinarias en los departamentos de medicina de cuidados intensivos y respiratorios, ajustar dinámicamente los regímenes antiinfecciosos y evitar la toxicidad de los medicamentos, como ajustar las dosis de antibióticos en función de la función renal.

Por último, la "IA+TI+Solution" de Mindray ha realizado la construcción de un ecosistema. Las soluciones de TI "Sanrui" de Mindray, que incluyen "Ruizhilian" (interconexión de dispositivos), "Rayray Cloud++" (plataforma de imagen en la nube) y "Mindray Intelligent Inspection" (inspección inteligente), realizan todo el proceso, desde la recopilación de datos



hasta el análisis. Por ejemplo, Rayshadow Cloud++ admite imágenes endoscópicas 4K 3D, que visualizan claramente la jerarquía de los vasos sanguíneos.

A partir de 2024, Mindray ha saltado al puesto 23 en el ranking mundial de empresas de dispositivos médicos, y sus productos han cubierto más de 400 hospitales de todo el mundo, y la cuota de mercado de monitores, ultrasonidos y otros equipos se encuentra entre las tres primeras del mundo. Mindray ampliará el plan modelo a gran escala "Qiyuan" a los campos de la medicina de emergencia, la anestesia y la medicina de laboratorio, y desarrollará funciones como el control de calidad crítico y la asistencia en la investigación científica. Mindray ha mejorado significativamente la eficiencia y la homogeneidad del diagnóstico y el tratamiento a través de la tecnología de IA, que tiene una importancia estratégica para resolver el problema de la escasez de personal médico. Su sistema de IA no solo optimiza los flujos de trabajo clínicos (como reducir el tiempo de papeleo

en un 90%), sino que también promueve la transformación de la industria médica hacia la inteligencia digital a través de equipos inteligentes y diseño ecológico. En el futuro, con la aplicación cada vez más profunda del modelo de cuidados intensivos y la expansión de múltiples departamentos, se espera que Mindray consolide aún más su posición de liderazgo en el campo mundial de los dispositivos médicos.



Aunque Mindray se ha desarrollado rápidamente en la era de la atención médica inteligente moderna, que poco a poco está ocupando el escenario Mindray se compromete a lograr el éxito empresarial a largo

plazo mediante la creación de valor para la economía, el medio ambiente y la sociedad. Con la visión de Mindray de "una mejor atención médica para todos", Mindray considera que la sostenibilidad es el corazón de nuestro trabajo, una fuerza impulsora para el desarrollo y un elemento de gestión de riesgos. Los productos, soluciones y tecnologías de Mindray son capaces de integrarse con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, con la intención de contribuir a un mejor futuro de la humanidad. Salud. En Mindray creemos que la creación de valor social se basa en el sólido crecimiento de nuestro negocio. Para ello, creamos beneficios económicos sostenibles a través de un buen gobierno corporativo y una gestión integral del cumplimiento.

Desde el punto de vista de la ingeniería biomédica, Mindray cuenta con un gran equipo de servicio global y estableció el Departamento de Servicios de Desarrollo de BME en 2023 bajo la estructura de Servicio Global de Mindray, lo que indica el énfasis y las aportaciones en este campo de Mindray.

Serving 190+ countries and regions	1800+ service partners	4500+ Service engineers
110+ Service centers	7/24 Customer Contact Center services	15+ Hotlines & languages

Mindray cuenta con más de 110 centros de servicio en todo el mundo, con un centro de llamadas 24/7 que ofrece soporte en más de 15 idiomas. Nos hemos asociado con más de 1800 socios de servicio que cruzan Europa, América del Norte, Asia-Pacífico, América Latina, África, etc. De 2021 a 2023, el equipo de servicio global de Min-

dray ha recopilado más de 12.000 voces de clientes. Entre las voces, más de 5.000 se encuentran en la etapa de planificación del desarrollo, y más de 2.000 se han realizado en el producto. Eso hace que el producto y la solución de Mindray sean ampliamente aceptados y apreciados por el mercado global. Esa es también una contribución combinada entre BM/CE, Clinical y Mindray.



2024, en cooperación con la División de Ingeniería Clínica (CED) de la Federación Internacional de Ingeniería Médica y Biológica (IFMBE), la Alianza Global de Ingeniería Clínica (GCEA) y la Sociedad China de Ingeniería Clínica (CSCE), Mindray ha iniciado oficialmente el "Proyecto STAR" a nivel mundial y hasta 2025, Mindray ha iniciado una serie de proyectos y eventos de ingeniería médica, incluida la Serie Internacional de Salones en Línea de Ingeniería Médica, la opinión de los expertos: el Libro Blanco de Desarrollo Global Star CE-BME, la Transformación orientada a la Investigación de los Campos de Formación en Ingeniería Médica, el Foro Internacional de Ingeniería Clínica (ICEF 2024), etc.

Una de las partes más importantes del "Proyecto STAR" es la serie de salones en línea internacionales de ingeniería médica entre profesionales de BM/CE y profesionales de diferentes países y áreas. En 2024, Mindray ha organizado 17 salones



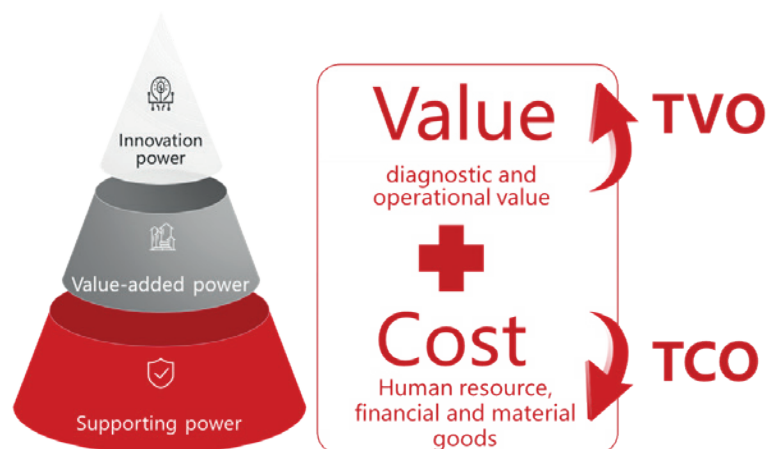
en línea para profesionales de la ingeniería clínica/biomédica hasta 2024, que cubren Asia, Europa, África, América del Norte, Oriente Medio y el área del Golfo con cientos de ingenieros, lo que se ganó una gran reputación entre los ingenieros mundiales, especialmente aquellos que trabajaron en sistemas de atención médica sin muchas oportunidades de participar en foros internacionales. Mindray proporciona una plataforma espléndida para que los ingenieros clínicos/biomédicos intercambien entre sí en todo el mundo.

Durante el ICEF 2024 en Shanghái, con la presencia de la profesora Fabiola Martínez, el profesor Ratko Magjarević, el profesor Elliot Sloane y profesionales de la ingeniería médica a nivel mundial, Mindray lanzó el plan para el "Libro Blanco" de Opiniones de Expertos sobre el Desarrollo Global Star CE-BME, e inició un nuevo

capítulo para la innovación integrada médica y de ingeniería global.



Después de la pandemia, el control de costos, la mejora de la calidad y la eficiencia, y la innovación se convierten en las principales preocupaciones prioritarias del desarrollo de BM/CE en la atención médica. Para cumplir con los requisitos principales de los profesionales globales de BM/CE, Mindray formuló el modelo de desarrollo



de equipos de ingeniería médica Global STAR, que enfatizaba tres capacidades que los futuros profesionales de BM/CE adquirirían: poder de apoyo, poder de valor agregado y poder de innovación.

El poder de apoyo de los profesionales de BM/CE es hacer que el equipo sea fácil de usar, mantener y administrar, para mejorar el diagnóstico hospitalario y la capacidad de tratamiento; El poder de valor agregado de los profesionales de BM / CE aumentaría el valor del dispositivo y el departamento, mejoraría el mecanismo de operaciones del hospital; El poder de innovación de BM/CE proporcionaría a los equipos de BME sistemas y plataformas innovadores, impulsaría la competencia y la influencia hospitalaria.

Al desarrollar estos "tres poderes", realizando la transformación del equipo BM/CE de orientado a tareas rutinarias a orientado a la investigación, Mindray aumenta el valor del equipo BM/CE y disminuye el TCO al tiempo que aumenta el TVO. Como socio de confianza, el equipo de servicio de Mindray siempre trabaja con los equipos de BME para proporcionar soluciones de servicio en tres dimensiones. En primer lugar, proporcionar solu-

ciones de transformación orientadas a la investigación de BME para optimizar el trabajo rutinario. En segundo lugar, proporcionar una solución de servicio para el desarrollo de la disciplina BME, incluyendo la consultoría de investigación y la comunicación internacional. En tercer lugar, desde la perspectiva de la industria, participar activamente en el desarrollo de estándares de la industria y el consenso de expertos, apoyando la cooperación en innovación en todo el mundo.

Mindray hizo realidad la transición de la garantía de dispositivos a la gestión de la tecnología de aplicaciones clínicas y la innovación en investigación científica, y exploró los nuevos contenidos y los nuevos modelos de cómo BME podría dar servicio a las clínicas. A través de la transformación de "servicio para dispositivo" a "servicio para clínica". Las personas de Mindray entran en los hospitales y departamentos, se acercan a la práctica clínica, conocen los requisitos clínicos, resuelven los problemas clínicos con métodos técnicos y de ingeniería innovadores y transforman estas innovaciones en nuevas funciones, nuevos parámetros, nuevos productos y soluciones. De esta manera, se aumenta el valor tanto para la BM/CE como para la clínica.

Técnicas para la evaluación y la remediación de los efectos de la privación de sueño empleando resonancia magnética funcional estimulación magnética transcraneal

El sueño es importante para la recuperación del cuerpo y la consolidación de la memoria. La falta de sueño puede provocar ataques cardíacos, diabetes y presión arterial alta. Varios estudios informan de una disminución del rendimiento cognitivo después de la privación del sueño, especialmente en la memoria de trabajo. El objetivo de este estudio fue evaluar los efectos de la privación del sueño en la memoria de trabajo utilizando la tarea N-back con tres niveles de carga (0-back, 1-back y 2-back).

Evaluación:

Una tarea N-Back consiste en la presentación de estímulos de forma secuencial (secuencias de palabras imágenes, etc), en la que los participantes deben determinar si el estímulo actual coincide con el que se mostró hace 'n' ensayos con "n" variables para aumentar o disminuir la carga cognitiva.

La figura 1 muestra el esquema para las tareas 0-back, 1back y 2-back. En el caso de 0-Back, se solicita que el sujeto oprima una botonera cuando la letra Y aparece después de que aparezca la letra X. Esta sería la respuesta correcta Target, T. En el caso de la tarea 1-back, el sujeto debe oprimir la botonera cuando se presente la

misma letra que se había presentado inmediatamente antes de la del ensayo. En este caso se ve cuando se presenta la segunda Y y la segunda P. La tarea 2back consiste en evaluar si el sujeto recuerda la letra que se presentó dos eventos antes. Es decir, cuando responde que las letras F y H aparecieron dos eventos antes.

Doce voluntarios sanos (hombres y mujeres) se sometieron a 24 horas de privación del sueño (SD). Y se aplicaron las pruebas de 2-Back mientras se realizaba un estudio de imagenología por resonancia magnética funcional (fMRI) empleando un equipo Philips Achieva de 3T de campo magnético. Se obtuvieron 480 scans por sujeto. Se observó que después de la privación hubo una disminución de la precisión de sus respuestas, mientras que los tiempos de reacción aumentaron. Se encontró una disminución de la activación después de la privación del sueño, principalmente en el lóbulo frontal, el área de Wernicke y en algunas otras áreas ubicadas en el lóbulo occipital, el lóbulo parietal y los lóbulos temporales. También encontramos una mayor activación en el cíngulo, la ínsula y algunas otras áreas ubicadas en el lóbulo temporal y los lóbulos parietales. Estos resultados confirman la evidencia previa de que los lóbulos frontales se ven

0-back						
F	Y	X	Q	X	P	X
NT	NT	T	NT	T	NT	T
1-back						
F	Y	Y	Q	X	P	P
NT	NT	T	NT	NT	NT	T
2-back						
F	Y	F	Q	H	P	H
NT	NT	T	NT	NT	NT	T

Figura 1 muestra el esquema para las tareas 0-back, 1back y 2-back

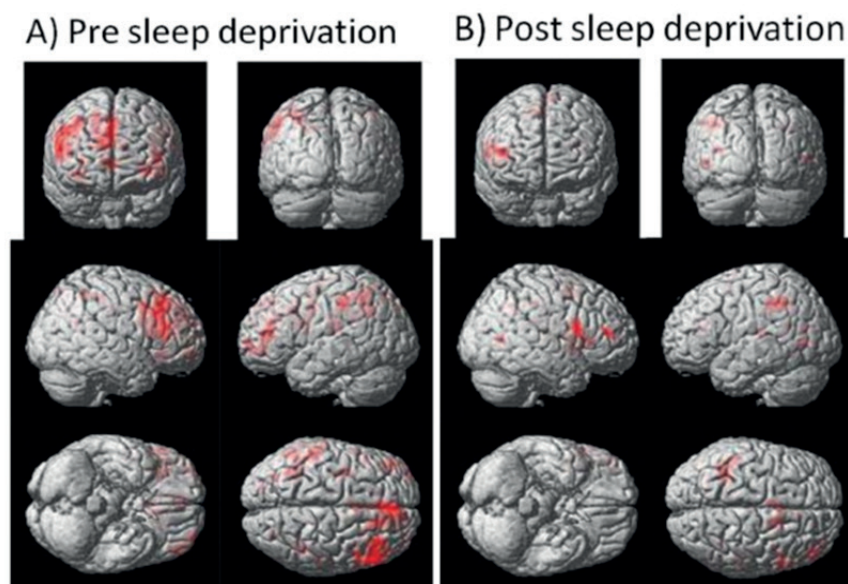


Figura 2 resultados de las respuestas a las tareas 2Back antes y después de la privación de sueño

seriamente comprometidos después de la privación del sueño.

La figura 2 muestra los resultados de las respuestas a las tareas 2Back antes y después de la SD en proyecciones axiales, coronales y sagitales de regiones que muestran activación significativa. Se encuentra una disminución de las respuestas en las zonas frontales. Según los resultados, los lóbulos frontales, que son conocidos por involucrar funciones de memoria de trabajo, se comprometen seriamente después de SD y esto se puede observar a través de una disminución en la precisión y el aumento en los tiempos de reacción [3].

B: Remediación

La estimulación magnética transcraneal (TMS) es una técnica de neuroestimulación y neuromodulación utilizada desde 1980. TMS ha demostrado su efectividad para tratamientos clínicos como la depresión y se ha utilizado en neurociencia cognitiva para diferentes protocolos experimentales.

En este caso, quisimos evaluar si la técnica TMS podría revertir la baja de desempeño producida por la privación de sueño. Para evaluar los efectos repetitivos de estimulación magnética transcraneal (RTMS), se pueden usar imágenes de fMRI. Para la evaluación del rendimiento se aplicaron las técnicas previamente descritas para la tarea del 2-Back en sujetos con SD, antes y después de la estimulación.

Para la aplicación de TMS repetitivo de alta frecuencia, se usó una bobina en forma de 8 junto con el estimulador MAPPRO R30 (Magventure®). Antes del estudio, los sujetos fueron asignados aleatoriamente a uno de los tres grupos de estimulación diferentes: giro frontal medio (MFG), giro occipital medio (MOG) o estimulación simulada (sham). Los objetivos fueron seleccionados de acuerdo con referencias anatómicas.

En el caso de la estimulación simulada, la bobina se colocó perpendicularmente a la cabeza (ángulo de 90 °) con un ala tocando



Figura 3 Estimulador MAPPRO R30 (izquierda), posicionamiento de la bobina (derecha)

el cuero cabelludo. Usando esta técnica, el sujeto no puede determinar si la estimulación es falsa o verdadera.

Las áreas de estimulación se seleccionaron debido a su participación en la memoria de trabajo y los efectos de la privación del sueño. La estimulación consistió en una sola sesión de 20 minutos con una frecuencia de 5Hz (estimulación 10seg, pausa de 50Seg.). Esta se administró en el hemisferio izquierdo al 100% del umbral del motor (MT es la intensidad de la estimulación que activa la corteza motriz).

La adquisición de las imágenes y el paradigma aplicado fueron los mismos que se describieron en la sección anterior.

En medio de la sesión de estimulación, se pidió a los sujetos que indicaran la sensación en el cuero cabelludo en una escala de 1 (sin sentimiento) a 10 (doloroso). En promedio, la medida de sensación fue de

3 (± 1.9), lo que indica que los voluntarios no pudieron distinguir si era una estimulación verdadera o falsa.

También se aplicaron escalas analógicas visuales (VAS), antes y después de la estimulación (0: valor mínimo y 10: valor máximo) para la evaluación perceptiva del estado de ánimo en diferentes categorías.

Según los resultados de VAS, se encontró un aumento posterior a TMS en la categoría de felicidad en ambos sitios de estimulación verdadera (MFG y MOG), pero no se encontró ningún efecto en el grupo de estimulación simulada. En la categoría de ira, se encontró disminución en todos los sitios de estimulación, mientras que la mayor disminución se encontró en el grupo de estimulación MOG. En la categoría de incomodidad, se observó disminución solo en el grupo de estimulación MFG y el aumento fue más pronunciado en el grupo simulado.



Figura 4 escalas analógicas visuales (VAS)

El análisis de los datos de fMRI se centra en los contrastes 1-back > 0-back y 2-back > 0 contrastes por grupo de estimulación. En los sujetos estimulados en la circunvolución frontal media, se encontró un aumento en la activación para ambos contrastes (1-back > 0-back y 2-back > 0-back), de acuerdo con los mapas estadísticos obtenidos; especialmente en áreas relacionadas con lóbulos frontales, algunas partes de Lóbulo occipital y temporal, y en muy pocas áreas del lóbulo parietal.

Si bien nuestros resultados deben considerarse preliminares, los sujetos privados de sueño con estimulación verdadera mostraron una mejora en la percepción y el rendimiento, especialmente en aquellos con estimulación de MOG, en comparación con el grupo de estimulación simulada.

En los sujetos estimulados en el giro occipital medio, se encontraron menos respuestas incorrectas y tiempos de respuesta más cortos. La precisión más baja y los tiempos de respuesta más largos se encontraron en sujetos con estimulación simulada. Los resultados obtenidos son consistentes con los reportados en la literatura. La figura 5 muestra la superficie 3D de las

respuestas cerebrales antes y después de la privación del sueño en A) grupo MFG, b) grupo MOG y C) grupo simulado, para mostrar de manera general el patrón de actividad ($p < 0.001$).

En resumen, los resultados indican que existen diferencias entre los diferentes sitios de estimulación, por lo que será interesante explorar más a fondo estas áreas con una población de mayor tamaño. Además, debemos mencionar que la aplicación de estimulación magnética transcraneal de alta frecuencia se administró de manera segura para todos los sujetos y no se encontraron efectos secundarios graves durante o después de la sesión de estimulación [4].

J. Azpiroz-Leehan, M. Cadena and N. Ramos-Ibañez, "Comparative statistical analysis between two methods for the measurement of visceral fat in humans," 2013 Pan American

Health Care Exchanges (PAHCE), Medellín, Colombia, 2013, pp. 1-4, doi: 10.1109/PAHCE.2013.6568304.

Paloma Almeda-Valdes, Donaji V Gómez

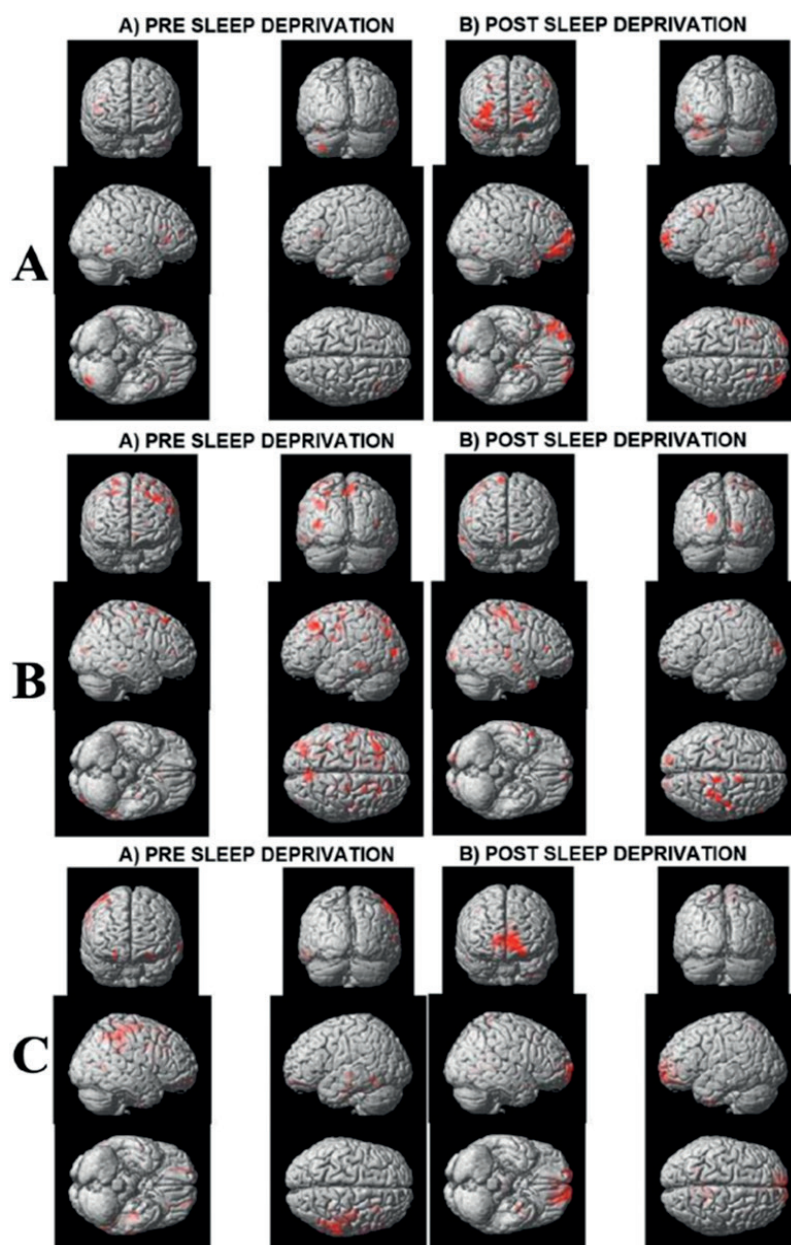


Figura 5 superficie 3D de las respuestas cerebrales antes y después de la privación del sueño

Velasco, Olimpia Arellano Campos, Omar Yaxmehen Bello-Chavolla, Magdalena del Rocío Sevilla-González, Tannia Viveros Ruiz, Alexandro J Martagón Rosado, Claudia J Bautista, Liliana Muñoz Hernández, Ivette Cruz-Bautista, Hortensia Moreno-Macias, Alicia Huerta-Chagoya, Karen Guadalupe Rodríguez-Álvarez,

Geoffrey A Walford, Suzanne B R Jacobs, Luz E Guillen Pineda, Ma Luisa Ordoñez-Sánchez, Ernesto Roldan-Valadez, Joaquín Azpiroz, Jannette Furuza-wa-Carballeda, Patricia Clark, Miguel F Herrera-Hernández, Elena Zambrano, Jose C Florez, María Teresa Tusié Luna, Carlos A Aguilar-Salinas, The SLC16A11

risk haplotype is associated with decreased insulin action, higher transaminases and large-size adipocytes, *European Journal of Endocrinology*, Volume 180, Issue 2, Feb 2019, Pages 99–107, <https://doi.org/10.1530/EJE-18-0677>

Martínez-Cancino DP, Azpiroz-Leehan J, Jiménez-Angeles L. The effects of sleep deprivation in working memory using the n-back task. In: VI Latin American Congress on Biomedical Engineering CLAIB 2014, Paraná, Argentina 29, 30 & 31 October 2014, 2015 (pp. 421-424). Springer International Publishing.

Martínez-Cancino, Diana Paulina, et al. "Effects of high frequency rTMS on sleep

deprivation: a pilot study." *2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*. IEEE, 2016.

Del Angel, Francisco Lopez, Joaquin Azpiroz Leeahan, Fabiola Martínez, Emilio Sacristán Rock,

Andrés Morón, Gerardo Rosas, Ángel Fonseca et al. "Improved Outcomes in Hemodialysis/ Hemodiafiltration Treatments Applying Exercise and Physiological Monitoring Techniques: Preliminary Results." In *2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pp. 5527-5530. IEEE, 2019.

La Importancia de la Imagenología por Resonancia Magnética en la Última Década



En la última década, la Imagenología por Resonancia Magnética (IRM) ha emergido como una herramienta fundamental en la medicina moderna. Su capacidad para proporcionar imágenes detalladas de tejidos blandos, sin el uso de radiación ionizante, ha revolucionado el diagnóstico y el tratamiento de diversas patologías. Desde su introducción, la IRM ha experimentado avances significativos, que han ampliado sus aplicaciones y mejorado su precisión, consolidándola como una tecnología esencial en el cuidado de la salud.

Uno de los avances más destacados de la IRM, ha sido el desarrollo de imágenes funcionales como la técnica BOLD así como imágenes anatómicas de alta resolución. Estas innovaciones han permitido estudiar el cerebro en tiempo real, observando su actividad mientras los pacientes realizan tareas específicas. La resonancia magnética funcional (fMRI) ha sido especialmente valiosa en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades neurológicas como el Alzheimer, la epilepsia y los trastornos del espectro autista. Además, ha sido crucial en la planificación de cirugías cerebrales, ayudando a preservar funciones críticas como el lenguaje y el movimiento.

En el ámbito oncológico, la IRM ha desempeñado un papel central en la detección temprana y el monitoreo del cáncer. Las técnicas avanzadas como la espectroscopia por resonancia magnética han permitido identificar biomarcadores tumorales y evaluar la respuesta a tratamientos en tiempo real. Por ejemplo, en el caso del cáncer de mama, la IRM ha demostrado ser una herramienta eficaz para detectar lesiones en etapas tempranas, incluso en pacientes con tejido

mamario denso, donde las mamografías tradicionales son menos efectivas.

La cardiología también ha experimentado grandes beneficios gracias a la IRM. La capacidad de esta técnica para evaluar la estructura y función del corazón sin procedimientos invasivos ha transformado el diagnóstico de enfermedades cardiovasculares. La IRM cardíaca ha sido particularmente útil en el diagnóstico de miocardiopatías, la evaluación de cicatrices postinfarto y la caracterización de masas cardíacas. Su precisión ha permitido a los médicos personalizar tratamientos y mejorar los pronósticos de los pacientes.

A pesar de estos beneficios, la IRM no está exenta de desafíos. Es conocido que se requiere un presupuesto de inversión considerable y la necesidad de recursos humanos especializados, esto limita su disponibilidad en muchas regiones, especialmente en países en desarrollo. En México existen únicamente dos laboratorios nacionales dedicados a la investigación de IRM.

En términos de producción científica, en los últimos 10 años se han publicado 676,984 trabajos indexados que hablan sobre la IRM (Fig.1). A pesar de que el mundo se detuvo por la pandemia de COVID-19 la producción de temas relacionados con la IRM no se detuvo ni se contrajo.

Países como Estados Unidos (US) y China(Ch), potencias mundiales en investigación tienen una producción de mas de 100,000 trabajos relacionados a la IRM, produciendo en promedio en US 20,000 trabajos anuales y en Ch 10,000 (Fig. 2). Mientras que en regiones como Latinoa-

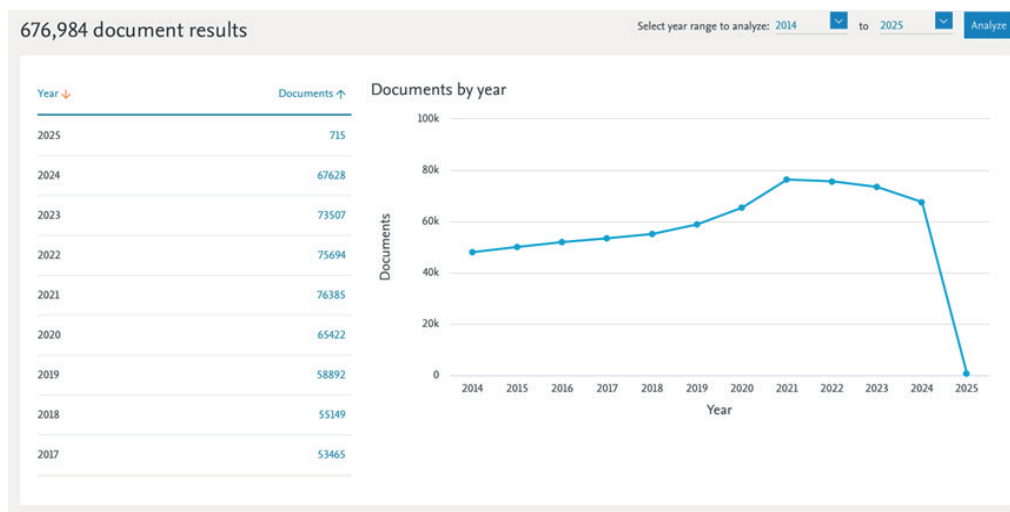


Fig. 1 - Trabajos indexados sobre el tema de Imagen por Resonancia Magnética anualmente.

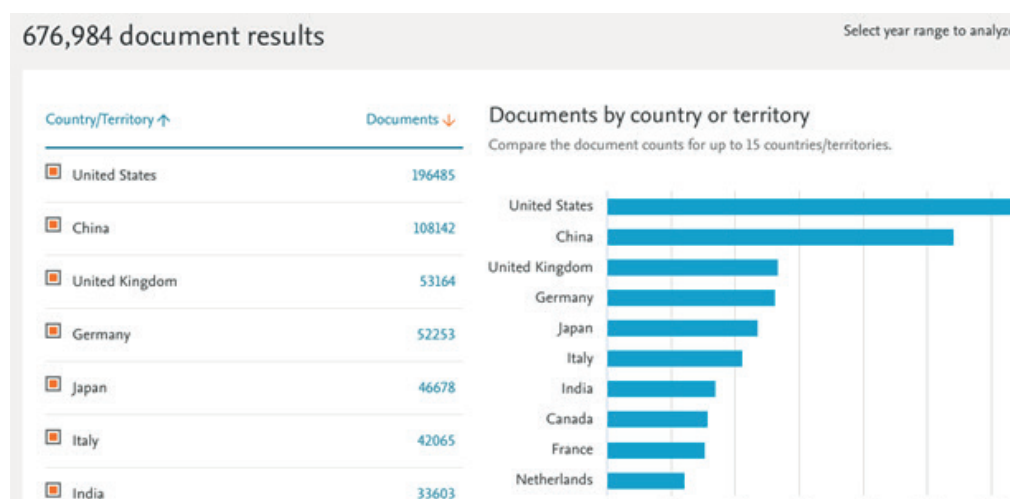


Fig. 2 - Número de trabajos sobre IRM producidos por país en los últimos 10 años.

mérica y específicamente en México producimos en promedio 268 trabajos sobre IRM al año (Fig. 3), esto quiere decir que en la última década US tuvo una producción de trabajos sobre IRM 7,592.3% mayor a la de México.

En 2023, la población de México alcanzó aproximadamente 129.5 millones de habitantes según estimaciones oficiales del INEGI y el Banco Mundial. En cuanto al Producto Interno Bruto (PIB), se reportó

un crecimiento anual del 3.1% en términos reales respecto al año anterior. Este incremento estuvo impulsado principalmente por el consumo interno y la inversión en infraestructura pública, situando el valor del PIB en aproximadamente \$1.5 billones de dólares.

US que tuvo en 2023 una población de 334.9 millones de habitantes y un PIB de \$26.9 billones de dólares lo que podemos interpretar como que la población en US

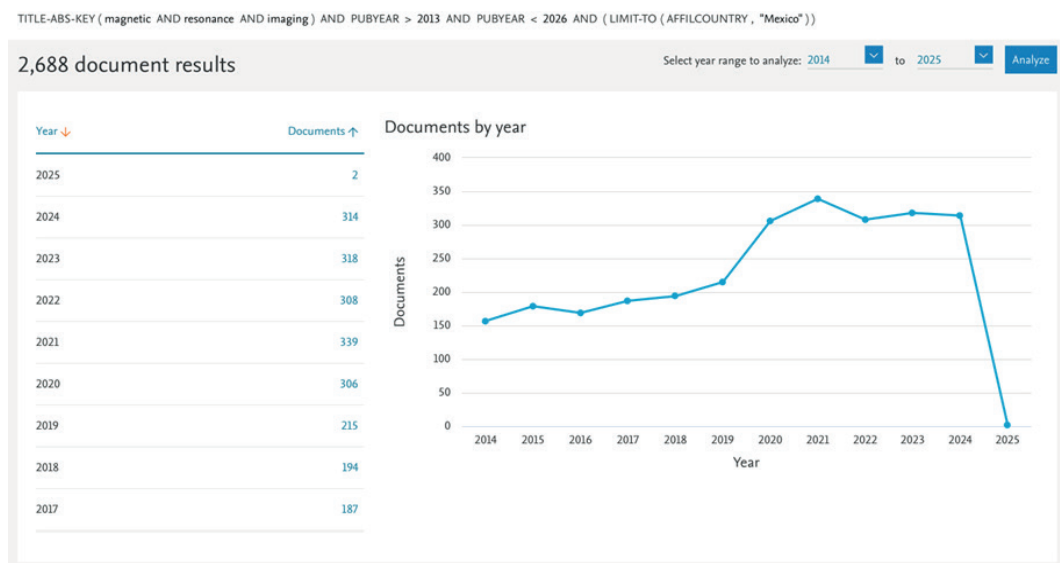


Fig. 3 - En la última década México produjo 2,688 trabajos que hablan sobre la IRM.

es 158.6% mayor que la de México y que el PIB de Estados Unidos es aproximadamente 1,693.3% mayor que el de México. Si bien económicamente es una gran diferencia, no es comparable a la diferencia que existe entre el número de publicaciones sobre IRM entre ambos países.

Otro tema importante sobre esta diferencia es que en otras regiones los trabajos interdisciplinarios son cada vez mas comunes, la IRM por su naturaleza diagnostica y predictiva la hace una herramienta sumamente importante en diferentes áreas de investigación (Tabla 1).

Dentro de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), se imparten carreras en diferentes áreas como son la Ingeniería Biomédica, Medicina, Psicología, Psicología Biomédica, Veterinaria, Economía entre otras. Sin embargo existe muy poca comunicación entre dichas áreas para el desarrollo de proyectos de investigación o cursos académicos que incluyan a la IRM como método de análisis.

Disciplina	Cantidad
Medicine	536,153
Neuroscience	119,894
Biochemistry, Genetics, and Molecular Biology	89,573
Engineering	36,685
Computer Science	33,710
Health Professions	25,887
Psychology	17,331
Physics and Astronomy	16,944
Pharmacology, Toxicology, and Pharmaceutics	16,564
Materials Science	15,820
Chemistry	15,672
Multidisciplinary	13,398
Immunology and Microbiology	13,349
Mathematics	11,118
Chemical Engineering	10,488
Nursing	7,671
Agricultural and Biological Sciences	5,504
Veterinary	4,439
Social Sciences	3,829
Dentistry	2,823
Decision Sciences	2,666
Environmental Science	2,543
Arts and Humanities	2,366
Energy	1,721
Earth and Planetary Sciences	745
Business, Management, and Accounting	544
Economics, Econometrics, and Finance	237

Tabla1 - Número de trabajos de investigación publicados en los últimos 10 años, por cada disciplina.

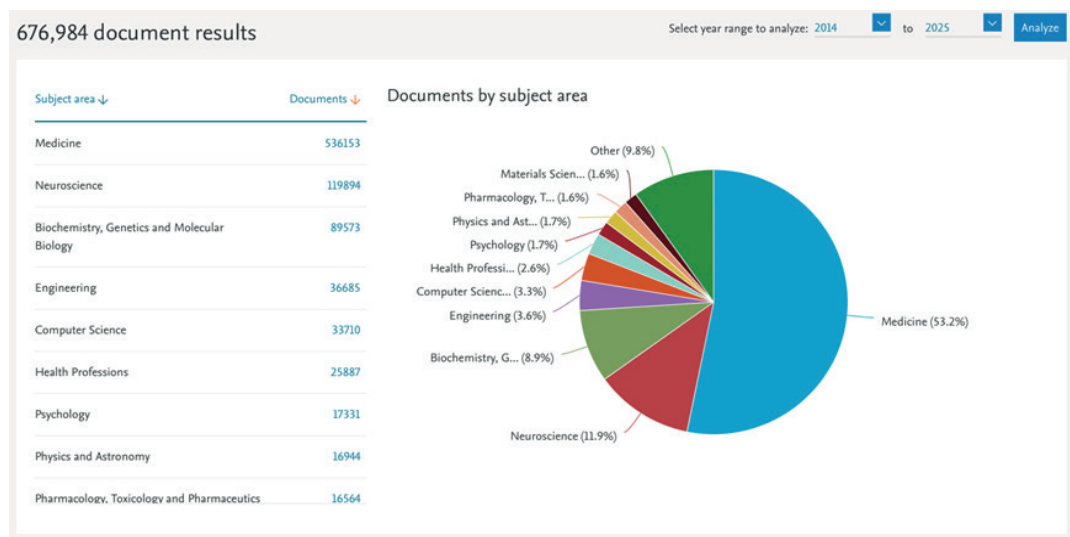


Fig. 4 - Gráfica de porcentajes de publicación por disciplina a nivel mundial, en la última década.

En los últimos 10 años las áreas que mayor desempeño han tenido publicando trabajos de investigación relacionados con la IRM son: la Medicina con el 53%, las Neurociencias con el 11.9% y la Biología con el 8.9% (Fig. 4).

Los pasados 10 años han sido testigos de cómo la IRM ha ido evolucionando a una interdisciplina, combinando avances en física, ingeniería, medicina, neurociencias y ciencias de la computación. Su desarrollo viene de la mano de la necesidad de mejorar el diagnóstico y la investigación en las ciencias biomédicas, esto ha llevado a la integración de inteligencia artificial para el análisis de imágenes, algoritmos de reconstrucción avanzados, y modelos computacionales para la interpretación de datos. Además, la IRM no solo es utilizada en el ámbito clínico, sino también en áreas de investigación como la psicología cognitiva, la farmacología y la investigación en materiales biológicos, permitiendo una comprensión más profunda de la

estructura y función de los tejidos. Esta convergencia de disciplinas ha dado lugar a innovaciones como la fMRI, que estudia la actividad cerebral en tiempo real, y la IRM por tensor de difusión, que permite mapear la conectividad estructural.

En conclusión, la imagenología por resonancia magnética ha transformado la práctica médica en la última década, mejorando el diagnóstico, tratamiento y pronóstico de diversas enfermedades. A medida que la tecnología continúa evolucionando, su impacto seguirá creciendo, acercándonos a una medicina más precisa y personalizada. Invertir en el desarrollo y accesibilidad de la IRM es una prioridad para garantizar que sus beneficios lleguen a una mayor proporción de la población mundial.

Toda la información sobre este reporte fue obtenida de la base de datos Scopus usando el siguiente algoritmo de búsqueda (TITLE-ABS-KEY (magnetic AND resonance AND imaging) AND PUBYEAR > 2013 AND PUBYEAR < 2026)

1. <https://www.scopus.com/search/form.uri?display=basic#basic> pib_pconst2024_02.pdf.
2. https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2024/pib_pconst/
3. <https://www.cefp.gob.mx/publicaciones/documento/2024/cefp0032024.pdf>

Como cada mañana



Luis Quiñones Hernández

Abro los ojos. Estoy muy cansado. Me levanto temprano, como cada mañana. Siento como si hubiera tenido una pesadilla; no recuerdo nada, solo tengo la sensación de que tenía que ver con un espejo.

Me alisto para ir a dar clases a la universidad. Me doy una ducha y me arreglo lo mejor que puedo, pero desde que se rompió el espejo del baño, no le doy mucha importancia a mi peinado. En fin, para el poco cabello que me queda, no creo que nadie se dé cuenta.

Prendo la radio que he tenido desde que yo mismo era estudiante. Aún suena perfectamente, tan clara como el primer día, pero está tan vieja que ya casi no le funciona ningún botón; con trabajo puedo sintonizar alguna estación. Por suerte, siempre la tengo en el noticiero. Después de tantos años, sigue siendo mi forma favorita de escuchar las noticias.

Últimamente, siento que el locutor cambia casi cada semana. Además, fuera de las tragedias que ocurren a diario, a veces parece que solo balbucean, y no entiendo una palabra de lo que dicen. A mi edad, es imposible estar al día con las modas y el nombre de las nuevas estrellas de cine, así que no le doy mucha importancia.

Mientras escucho las noticias, me propongo preparar un pan tostado. Últimamente, la tecnología ha avanzado tanto que, a mi edad, ya no tengo ganas de aprender cómo funciona la tostadora con tantos botones y modos. Por eso pongo el pan en una sartén sobre la estufa hasta que agarra un color café claro, justo como me gusta.

Comienzo por hervir un poco de agua para prepararme un café, cuando me doy cuenta de la hora. Ya se me está haciendo tarde;

últimamente, el tiempo se me va volando. Por mucho que me desagrade la tecnología, hoy es el día perfecto para utilizarla y hacerme un café. Sin embargo, parece casi un rompecabezas. ¿Dónde demonios va el café? ¿Por qué hay tantos compartimientos? ¿Habrá que apretar algún botón para encontrar el compartimiento correcto?

Después de un rato, por fin lo comprendo: hay un compartimiento para el agua y otro para el café. No es tan difícil. Pongo unas cucharadas de mi café favorito en la cafetera, lleno el compartimiento de agua y espero... pero no pasa nada.

—¿Pero qué demonios es esto? —murmuro, frustrado.

Se supone que esta basura debería hacer el café de manera más fácil y rápida, pero me está quitando más tiempo del que debería ahorrarme. Enojado, comienzo a apretar todos los botones para ver si alguno funciona. Intento presionarlos de distintas formas, pero nada.

De pronto, una presión en la espalda me pone inquieto, como si alguien estuviera observándome y burlándose de mí. No volteo. Quienquiera que sea, debe estar divirtiéndose al ver a un viejo pelear con la tecnología. Le doy vueltas a la máquina, buscando algo que me ayude a entenderla, pero no encuentro nada. Mientras tanto, la sensación de ser observado crece en mí. Quizá la persona no se esté burlando; tal vez solo quiera ayudar.

Finalmente, decido voltear para preguntar, pero no hay nadie. Solo la ventana vacía.

No sé en qué estaba pensando. Esa ventana ni siquiera da al exterior; solo conduce

a un pequeño lavadero al que solo se puede entrar por la puerta de la sala.

Sacudo la cabeza y vuelvo a intentar hacerme un café. Este pequeño desliz me hace notar que todo este tiempo la cafetera estaba desconectada. Me siento como un tonto. La conecto, la enciendo y, riéndome un poco de mí mismo, pienso: Ha pasado tanto tiempo que ni siquiera recuerdo la última vez que usé este aparato, así que es normal que esté desconectada.

Después de unos pocos minutos, hay suficiente café para una taza. No tengo tiempo de averiguar cómo apagar la cafetera, así que simplemente la desconecto.

Sin más, como mi pan y tomo mi café. No está tan mal. Quizá mañana empiece a usar más esta cafetera.

Después de desayunar, tomo mis cosas y me siento en el sillón un rato, esperando a que den las 7:40. Después de tantos años, ya sé que, si salgo exactamente a esa hora, llegaré justo a tiempo, incluso si surge algún imprevisto.

Pero hoy, el reloj parecía no avanzar.

De pronto, escucho un grito. Al principio, me sobresalto, pero, al prestar atención, me doy cuenta de que es solo el señor del gas que pasa todas las mañanas alrededor de las ocho.

Demonios.

El maldito reloj de la sala debe haberse quedado sin batería. ¿Cómo no me di cuenta antes? Salgo corriendo, intentando no exaltarme. No pasa nada. Aún puedo llegar a tiempo si camino a buen paso.

Cuando llego al metro, ocurre lo peor: mi boleto no funciona. Intento comprar otro, pero la persona de la ventanilla me dice que ahora todos los accesos han sido cambiados para funcionar con tarjeta. Otra vez, la tecnología juega en mi contra.

El sujeto de la ventanilla me sugiere que hable con el policía. Voy con él y le explico mi problema con el boleto. Me mira con una expresión extrañada, y luego se ríe. Al final, me deja entrar. Dice que los ancianos pueden pasar gratis, como cada mañana.

Abordo el tren y me siento en uno de los muchos lugares disponibles. Quizá debería conseguir una de esas tarjetas pronto. Está bien que me dejen pasar gratis, pero aún me da un poco de vergüenza. Aunque, para ser justos, tengo la fortuna de ir siempre en contraflujo de la mayoría de las personas, así que no hay mucha gente que me vea.

Mientras reflexiono, el tren se detiene en una estación. Apenas subí hace un momento, por lo que no puede ser esta donde debo bajarme. Sin embargo, vuelvo a sentir esa presión en la espalda, como si alguien me estuviera observando. Pienso que tal vez sea solo una sensación provocada por creer, equivocadamente, que esta es mi estación, así que no le doy importancia.

El tren permanece detenido más tiempo del habitual, y esa sensación de ser observado no hace más que intensificarse.

Al diablo con mi orgullo, pienso, y alzo un poco la mirada para ver el nombre de la estación...

Pero, de repente, un escalofrío recorre todo mi cuerpo y me deja paralizado.

Lo veo con el rabillo del ojo: hay alguien allí. Al otro lado de la ventana del tren, alguien me está mirando.

Bajo la mirada de inmediato, pero puedo sentir perfectamente su mirada fija, penetrante, perforándome la nuca. No tengo el valor de levantar la cabeza. Ni siquiera pude distinguir quién era, ni un solo rasgo de su rostro. Solo la certeza de que alguien me observaba.

Mi corazón comienza a latir con fuerza, y el escalofrío inicial se transforma en un sudor frío que me empapa la espalda.

—¿Qué demonios pasa? —murmuro para mí.

¿Por qué el tren está detenido tanto tiempo? Miro hacia los lados, pero estoy solo en este vagón. Nadie más está aquí.

"Debe ser un loco", pienso. Mientras no entre al vagón, todo estará bien.

Cierro los ojos un instante para intentar calmarme, pero entonces lo escucho: alguien entra rápidamente al vagón, seguido de un estruendo.

Abro los ojos, sobresaltado.

El estruendo solo fue el sonido de las puertas cerrándose, y la persona que entró es una joven pálida, de cabello rojo, que corrió para alcanzar el tren.

Suspiro, aliviado.

Fue una experiencia aterradora, pero hay tantos locos en el metro que probablemente no debí haberle dado tanta importancia.

Cuando el tren se detiene de nuevo, veo que ahora sí es mi estación. Me siento aliviado. No sé qué haría si tuviera que regresar a la estación donde vi a ese loco.

Al llegar a la escuela, camino hacia el edificio donde está mi oficina. Es el edificio con más pisos de toda la universidad, pero, por suerte, mi oficina está en el segundo piso, así que no tengo que subir muchas escaleras. Nunca me ha gustado usar el elevador; además, sin importar lo que digan, seguiré usando mis piernas mientras pueda.

Voy a la misma oficina de siempre: la segunda puerta, tomando el pasillo izquierdo después de subir las escaleras. Intento meter la llave, pero entonces me doy cuenta de algo extraño. El cerrojo no solo se ve diferente, sino que no tiene el orificio para la llave.

—¿Cómo demonios se abre esto? —murmuro, confundido.

Hay una serie de botones con números, como esas cerraduras modernas que funcionan con una contraseña. Pero... ¿quién demonios le puso esto a mi puerta? No tiene sentido. Al alzar la vista para revisar la placa de la puerta, la respuesta me golpea: ese no es mi nombre.

De hecho, ni siquiera es un nombre que reconozca.

De inmediato, pienso que me he equivocado de piso. No sé cómo puedo estar tan distraído hoy, pero supongo que no ha sido mi mejor día. Ahora tengo un dilema: aunque el edificio no sea un rascacielos, no entiendo por qué no ponen un letrero indicando el número de cada piso.

Bueno, pienso, si estoy equivocado, seguramente subí solo un piso de más. Decido subir al siguiente. A medida que avanzo, los escalones se vuelven cada vez más pesados. Son las cosas que vienen con la edad, me digo.

Pero al llegar a la puerta que debería ser la mía, me detengo.

No hay oficina. Solo un pequeño armario de limpieza.

—No puede ser —susurro—. ¿Esto significa que estoy en el cuarto piso? ¿O qué demonios está pasando?

Frustrado, comienzo a caminar por los pasillos en busca de alguien a quien preguntar. Sin embargo, no veo a nadie.

Eso me resulta muy extraño.

Camino y camino, intentando calmarme. A medida que avanzo, los pasillos se sienten interminables. Ha pasado tanto tiempo desde la última vez que recorrí todo el edificio... probablemente no lo hago desde que me asignaron una oficina aquí.

Una mezcla de nostalgia y asombro me invade. Estos pasillos, tan familiares y, a la vez, tan lejanos en mis recuerdos, despiertan sensaciones olvidadas. Pero esa nostalgia pronto se convierte en algo más pesado, algo oscuro.

No sé cuánto tiempo llevo caminando, pero los pasillos comienzan a volverse cada vez más laberínticos.

Apuro el paso, intentando llegar a algún lugar familiar. Mi corazón late más rápido con cada giro.

Entonces, me detengo en seco.

Una ventana.

Quizá, si me asomo, pueda ubicarme mejor y salir de esta pesadilla. Me acerco lentamente.

Y mi corazón se detiene por un instante.

Ahí está de nuevo. El hombre del metro.

Lo ignoré, pensando que era un loco cualquiera. Pero ahora está aquí, mirándome desde el otro lado del cristal.

¿Me siguió hasta la escuela? ¿Qué hice para provocarlo?

El pánico me consume. Sin pensarlo, giro sobre mis talones y salgo corriendo por el único pasillo disponible. No sabía que podía correr tan rápido, pero no me importa: tengo que escapar de ese maldito.

Sé que me sigue. Lo escucho. Las pisadas resuenan detrás de mí, persiguiéndome.

A lo lejos, las puertas del elevador están abiertas.

Normalmente no lo uso, pero si intento bajar las escaleras y me caigo, estoy muerto.

Sin pensarlo dos veces, salto dentro del ascensor y comienzo a presionar todos los botones. Mis manos tiemblan mientras espero que algo suceda. Cierro los ojos, inmóvil, conteniendo la respiración.

Y entonces lo oigo: el sonido de las puertas cerrándose, seguido por el ligero movimiento del ascensor que comienza a bajar.

Una sensación de alivio me envuelve...
pero solo por un momento.

Las puertas se abren otra vez.

El miedo me paraliza.

Claro, con tantos botones presionados,
debe estar deteniéndose en cada piso. Pero
no puedo abrir los ojos. No me atrevo.

Finalmente, las puertas se abren una úl-
tima vez.

—¡Buenos días! —una voz fuerte y ale-
gre rompe el silencio, haciéndome saltar
del susto.

Abro los ojos de golpe.

Delante de mí hay un hombre joven con
uniforme de cuidador. No lo reconozco.
Debe ser nuevo.

—Ah, disculpe... voy tarde para dar clase
—digo apresuradamente mientras salgo
del elevador.

—¡No hay problema! —me responde con
una sonrisa—. Por cierto, quería recordar-
le que la contraseña para su oficina es su
mes y año de nacimiento. Ayer me pidió
que se la recordara.

Lo miro, incrédulo.

¿Qué? ¿Mi oficina?

La vergüenza me cala hondo, pero no ten-
go más remedio que fingir. Con una sonri-
sa incómoda, le respondo:

—Bueno, mejor recuérdamela mañana
también. Seguro la olvido otra vez.

El cuidador asiente, riendo.

—Claro que sí. No se preocupe. Como cada
mañana.

Al final, me dirijo al salón de clases, el
mismo que me asignan siempre para no
tener que caminar mucho. Pero al llegar,
veo que hay otro profesor dando clase.

Completamente extrañado, le pregunto si
hubo algún cambio en los horarios.

El hombre también parece sorprendido y,
tras dudar un momento, responde:

—Quizás hubo algún ajuste. Deberías ver-
lo con el coordinador de horarios.

Le doy las gracias y me retiro.

Esto es suficiente.

Hoy ha sido un día demasiado largo. Me
han pasado cosas raras, desconcertan-
tes... y aterradoras.

Ya daré clase otro día. Los alumnos esta-
rán encantados de tener un día libre.

Me voy de regreso al metro, enfadado y
sumido en pensamientos. El camino se
me hace cada vez más largo... no recorda-
ba que fuera así. Un escalofrío me recorre
la espalda.

Mi cerebro me dice que mire hacia atrás,
pero mi cuerpo se mantiene inmóvil. In-
tento seguir caminando, pero la sensa-
ción de algo —o alguien— detrás de mí
no deja de molestarme. Rápidamente,
mientras cruzo la calle, miro por encima
del hombro.

No hay nadie. Solo una calle vacía.

Respiro hondo y sigo caminando, esta vez apretando el paso, pero la ansiedad persiste, como un nudo en el estómago.

Cuando finalmente llego al metro, algo no está bien.

No reconozco la estación.

—¿Caminé demasiado? —me pregunto en voz baja.

No sentí que fuera una caminata tan larga, pero... iba muy distraído.

Entro a la estación. Claro, todavía tengo mi boleto, aunque sé que aquí probablemente no aceptan boletos. Me acerco a la ventanilla: compraré una tarjeta y aprovecharé para preguntar cómo llegar a una estación conocida.

Delante de mí hay una persona más.

Es una chica.

Tiene la piel pálida y un cabello rojo tan brillante que parece imposible ignorarlo. Está de espaldas, pero puedo ver su rostro reflejado en el vidrio de la ventanilla. Sus rasgos son delicados, exóticos. En México, una chica así no es algo que se vea todos los días.

Termina de cargar su tarjeta y se marcha.

Mientras la veo alejarse, un frío helado me recorre la espalda.

Ahí está otra vez.

Él.

El loco.

Está en la ventanilla.

Mi cuerpo entero se tensa. Mi respiración se vuelve pesada. ¿Qué le hice yo? ¿Por qué me acosa de esta manera?

Me quedo paralizado solo por un segundo, pero reúno fuerzas y salgo corriendo. Subo las escaleras tan rápido como puedo, buscando la salida para perderlo de vista de una vez por todas.

El aire frío me golpea cuando finalmente emergo a la superficie.

Giro la cabeza de un lado a otro.

Nada.

No reconozco dónde estoy. Ni siquiera sé cómo llegué aquí.

Intento buscar a alguien que me ayude, pero no puedo moverme. El miedo me mantiene clavado en el suelo. A mi alrededor, la gente pasa rápidamente, ajena a mi pánico. Nadie me mira.

Tengo miedo.

No sé dónde estoy.

No sé por qué ese loco me persigue.

Pero lo que más me inquieta es la extraña certeza que se cuela en mi mente: esta situación... ya la viví antes.

No este lugar exacto. No estos detalles. Pero la sensación, la desesperación, el miedo... sí.

Cierro los ojos con fuerza. Intento calmarme.

No es real, me digo. No es real. Estoy seguro en casa. En mi cama. Durmiendo. Nada de esto está pasando...

Y de repente...

...Abro los ojos.

Estoy muy cansado. Me levanto temprano, como cada mañana.

Impresión 3D de imágenes médicas: un ejemplo de aplicación en docencia



Introducción

Desde el principio de la antigüedad hasta finales del siglo XIX, las únicas técnicas empleadas para sensar señales y anomalías en el cuerpo humano fueron la palpación y la auscultación.

Fue hasta 1887 cuando se registró el primer electrocardiograma por parte de Augustus Waller en un perro, y en 1901 cuando se empleó en humanos por primera vez, gracias a la invención del sistema de Wilhelm Einthoven.

Los rayos-X fueron descubiertos por Wilhelm Röntgen en 1895 cuando estudiaba los fenómenos de fluorescencia en tubos de rayos catódicos. Su primera aplicación documentada en la clínica fue en 1896 cuando se tomó una radiografía de la mano de un paciente con fracturas en Dartmouth Collage.

Las coincidencias temporales de las dos áreas tecnológicas de mayor impacto en la actualidad: la instrumentación y la imagenología médica se deben a los avances en la física en ese final del siglo XIX. Hoy en día estos avances y la importancia de los dos tipos de técnicas y sistemas siguen avanzando de forma paralela. Los gastos en tecnología médica se distribuyen equitativamente entre las dos áreas.

Imagenología Médica en el siglo XXI

En los últimos 25 años, las tecnologías de imagenología médica han avanzado significativamente. A continuación, se presentan los principales tipos de modalidades de imagenología y sus desarrollos clave:

1. Rayos X y Tomografía Computarizada (TC)

Rayos X (Radiografía): La radiografía 2D

tradicional sigue siendo una herramienta fundamental, y los avances en la radiografía digital mejoran la calidad de la imagen y reducen la dosis de radiación.

Tomografía Computarizada (TC): La TC multicorte inició a finales de la década de 1990. Permite adquirir múltiples cortes en una sola rotación, lo que mejora la velocidad y la resolución.

TC de energía dual: Se pueden obtener diferencias entre los tejidos según su absorción a dos energías de rayos X diferentes.

2. Resonancia Magnética (RM)

La RM de alto campo (3T y superior): Ofrece mayor resolución para imágenes neurológicas, musculoesqueléticas y cardiovasculares.

La RM funcional (RMf): Mide la actividad cerebral detectando cambios en el flujo sanguíneo, ampliamente utilizada en neurociencia.

Las Imágenes por Tensor de Difusión (ITD): Es una técnica que permite mapear los tractos de sustancia blanca en el cerebro (axones y nervios).

3. Ultrasonido (US)

Ultrasonido 3D/4D: Se utiliza en obstetricia y cardiología, ofreciendo imágenes volumétricas en tiempo real.

Elastografía: Mide la rigidez tisular, útil en la detección de enfermedades hepáticas y cáncer.

Ultrasonido con Contraste (CEUS): Utiliza agentes de contraste de microburbujas para mejorar la imagen del flujo sanguíneo en órganos como el hígado y el corazón.

Ultrasonido con IA: Permite la adquisición e interpretación automatizadas de imágenes, mejorando la precisión.

4. Medicina Nuclear (PET y SPECT)

Tomografía por Emisión de Positrones (PET): PET/TC y PET/RM híbridas: Combinan imágenes metabólicas y anatómicas, mejorando el diagnóstico del cáncer y la neurología.

Tomografía Computarizada por Emisión de Fotón Único (SPECT): Detectores mejorados y nuevos trazadores optimizan la imagenología para cardiología y neurología.

5. Tecnologías Ópticas y Emergentes de Imagen

Imagen Fotoacústica: Una técnica híbrida que combina ultrasonido y señales inducidas por láser, útil en oncología e imagen vascular.

Imagen Fluorescente y Molecular: Utiliza colorantes específicos para visualizar procesos celulares y moleculares, aplicados en oncología y navegación quirúrgica.

6. Inteligencia Artificial (IA) y Procesamiento de Imágenes

Los algoritmos con IA mejoran la reconstrucción de imágenes, la reducción de ruido y el diagnóstico. El aprendizaje profundo está revolucionando la radiología al facilitar la detección de tumores, fracturas y otras anomalías.

La evolución de las técnicas de imagenología médica lleva hacia una mayor resolución, una adquisición más rápida, una menor exposición a la radiación y diagnósticos basados en IA. Estos avances continúan impulsando la detección temprana de enfermedades, la medicina personalizada y el diagnóstico no invasivo.

En la actualidad la radiografía convencional sigue siendo la más empelada a nivel mundial, a lo mejor porque permite visualizar rápidamente y a bajo costo una gran cantidad de problemas anatómicos.

Sin embargo, las dos técnicas tomográficas más comunes, IRM y TAC tienen mayor resolución y permiten visualizar de mejor manera el interior del cuerpo humano. Se estima que el 25% de los estudios de imagenología emplean estas dos modalidades.

Impresión 3D de imágenes médicas.

Las tecnologías de visualización e impresión 3D han revolucionado la medicina al transformar imágenes médicas en modelos físicos o digitales interactivos.

Sus primeros usos documentados fueron en 1993, cuando se emplearon modelos basados en tomografías computadas para la planeación quirúrgica.

En realidad, es una extensión natural de la imagenología tomográfica: Si ya se tienen los cortes bidimensionales, se pueden apilar las rebanadas de estos y se puede armar un modelo completo.

Sus principales ventajas incluyen:

1. **Mejor Comprensión Anatómica**, ya que permite visualizar estructuras complejas en tres dimensiones, mejorando la interpretación de tomografías, resonancias magnéticas y ecografías. Además, facilita el estudio detallado de tumores, fracturas, malformaciones congénitas y órganos internos.
2. **Planificación Quirúrgica Precisa**: Los cirujanos pueden ensayar procedimientos con modelos 3D personalizados,

reduciendo errores y tiempos de operación. Además, mejora la precisión en neurocirugía, ortopedia, cirugía cardíaca y maxilofacial.

3. Educación y Formación Médica

Los modelos 3D ayudan a estudiantes y médicos a comprender mejor la anatomía y patologías sin necesidad de emplear cadáveres. Permite simulaciones quirúrgicas para el entrenamiento de especialistas.

4. Personalización de Dispositivos

Médicos y Prótesis

Se pueden fabricar implantes, prótesis y guías quirúrgicas personalizadas, mejorando la adaptación al paciente.

En ortopedia y odontología, se diseñan piezas a medida para mayor confort y funcionalidad.

5. Comunicación Médica y Paciente

Facilita la explicación de enfermedades y tratamientos a los pacientes, mejorando su comprensión y confianza. Puede ser una ayuda en la toma de decisiones conjuntas entre médicos y pacientes.

6. Reducción de Costos y Tiempo

Disminuye la necesidad de pruebas adicionales al mejorar la planificación. Reduce complicaciones quirúrgicas y mejora la recuperación postoperatoria.

Para poder armar una imagen completa en tres dimensiones, es necesario poder procesar los cortes en un espacio 3D, además de emplear técnicas de proyección, sombreado y segmentación de las imágenes.

Los pasos normales por seguir, para un corazón, por ejemplo, son:

1. Adquisición de la Imagen Médica

Se obtiene una Tomografía Computarizada (CT) o Resonancia Magnética (MRI) con cortes finos (<1 mm) para capturar detalles anatómicos.

Se usan secuencias optimizadas para visualizar el corazón y vasos sanguíneos (ej., angiografía por TC).

2. Procesamiento y Segmentación de la Imagen

Se exportan las imágenes en formato DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine).

Se utiliza un software de segmentación (ej., 3D Slicer, Mimics, OsiriX) para: Eliminar estructuras no deseadas (pulmones, huesos, etc.), aislar las cavidades cardíacas, arterias coronarias o válvulas y convertir los datos en un modelo 3D.

3. Conversión a Formato de Impresión 3D

Se guarda el modelo segmentado en formato STL (Standard Tessellation Language), compatible con impresoras 3D.

Se optimiza la malla 3D (reducción de ruido, suavizado, reparación de agujeros).

Se ajusta la escala y el nivel de detalle según el propósito del modelo (ej., cirugía, educación, planificación de implantes).

4. Elección de Material e Impresión 3D

Se selecciona la tecnología de impresión según la aplicación:

FDM (Fused Deposition Modeling): Económica, útil para modelos rígidos básicos.

SLA (Stereolithography) o PolyJet: Mayor resolución, ideal para modelos detallados.

Multi-material (Stratasys, Formlabs): Permite imprimir partes flexibles (simulación de tejidos).

5. Postproceso y Validación

Se eliminan soportes de impresión y se realiza limpieza y curado si se usaron resinas.

Se compara con la imagen original para verificar precisión anatómica.

Si es un modelo para cirugía, se revisa con el equipo médico antes de su uso.

Aplicación Práctica

En este trabajo, aplicaremos dos técnicas:

La segmentación por umbralización y por crecimiento de regiones, utilizando el formato DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) para construir un modelo 3D de un corazón con un bypass. El proceso de segmentación es fundamental para separar las diferentes estructuras anatómicas presentes en las imágenes médicas, y elegir el mejor resultado para la impresión 3D.

Finalmente, se presentarán y discutirán los resultados, incluyendo posibles problemas encontrados durante el proceso. Evaluaremos la calidad de la impresión y la presencia de anomalías médicas en el modelo impreso. Este enfoque no solo mejora la evaluación diagnóstica, sino que también facilita la planificación de tratamientos y la educación médica.

Protocolo

El archivo de tipo DICOM fue proporcionado por el Centro Nacional de Investigación en Imagenología e Instrumentación Médica (CI3M) de un paciente anónimo, en

donde muestra una tomografía del tórax. Estas imágenes deberán ser cargadas en el software elegido para su segmentación.

El software que será utilizado es 3D Slicer. Mediante este proceso podremos convertir cualquier estructura del archivo DICOM a STL con máxima precisión, en este caso nuestra ROI

Al desglosar las opciones de *Segment Editor* se encuentran diversas opciones que se pueden emplear. Nosotros utilizaremos principalmente es Grow from seeds (crecimiento de regiones). Este es un método semiautomático para la segmentación con 3D Slicer. Utiliza áreas llamadas semillas como referencia y extiende el segmento hasta rellenar el área delimitada. Esta herramienta identifica las zonas donde la intensidad cambia abruptamente y define esta unión como el límite para cada segmento.

Para utilizar la herramienta de semillas, primero se utiliza una herramienta para ajustar el brillo y el contraste que en la pantalla se muestra como un icono en la barra superior, esto con la finalidad de hacer ver mejor los bordes de la imagen y ajustar la opacidad requerida para identificar las distintas partes del corazón. Una alternativa que se puede usar en vez del ajuste de brillo y contraste es el efecto Threshold, umbral, que es una función que tiene el objetivo de seleccionar elementos que se encuentren dentro de un rango de intensidad. Esta es la manera más simple de convertir un DICOM a STL cuando el tejido a segmentar está bien delimitado. Por ejemplo, el hueso.

La opción *Use for Masking* almacena el rango de intensidad seleccionado para utilizarlo con las demás herramientas.

Otros efectos como pintar o dibujar sirven para señalar las áreas que pertenezcan a cada parte del órgano. Como mínimo debe haber 2 segmentos. Se agregaron 7 segmentos con los nombres de los ventrículos y aurículas derechas e izquierdas, vena cava, arteria pulmonar y aorta.

Cuando la segmentación sea adecuada se valida y esto dejará ver la imagen del modelo en colores más saturados y ese será el modelo 3D del corazón final que posteriormente será convertido a formato STL.

Una vez que estemos satisfechos con el segmento que hemos logrado solo queda exportarlo. La forma más sencilla es utilizando el panel de segmentaciones. En esta sección vamos a seleccionar las casillas Export y Models.

El procedimiento específico que se empleó fue:

1. En el software 3D Slicer se cargó la CT de tórax en formato DICOM.
2. Ajustamos el contraste y el brillo de la CT con el parámetro Window/Level para mejorar la visualización de las estructuras anatómicas.
3. En el menú "Segment Editor" creamos dos nuevos segmentos que le corresponden a los pulmones y a los huesos.
4. Con la herramienta "Threshold" ajustamos el rango de intensidades para para cada segmento.
5. Refinamos esta segmentación en el modelo 3D con la herramienta "Scissor".
6. Creamos los segmentos: pulmón izquierdo, pulmón derecho, corazón, aorta, vena cava superior, vena cava inferior, vena braquiocefálica izquierda, vena braquiocefálica derecha, tronco braquiocefálico, bypass y apéndice auricular izquierdo.
7. Se utilizó la herramienta "Grow from Seeds" para segmentar las estructuras

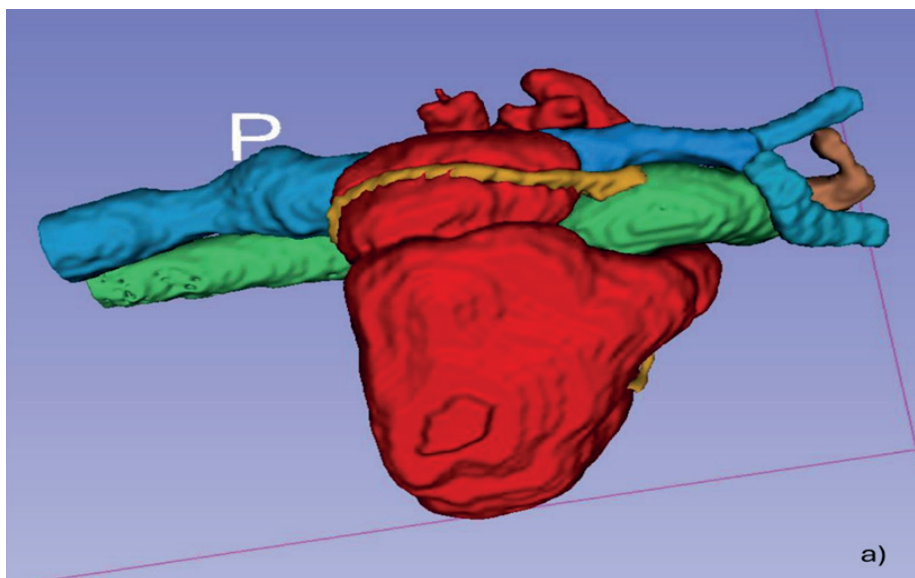


Figura 1. Imagen segmentada del estudio cardíaco

anatómicas de interés. Colocamos las semillas manualmente para cada uno de los segmentos.

8. Volvimos a utilizar la herramienta "Scissors" para eliminar fragmentos que no correspondían
9. Aplicamos la herramienta "Smoothing" para suavizar bordes y eliminar irregularidades.
10. Exportamos la segmentación en formato STL.

La última parte será la impresión en 3D, para esto se utilizó el software Cura. En este software es posible abrir el modelo en formato STL exportado de 3D Slicer, en el será posible hacer las configuraciones de la impresora según lo que creamos correcto y según la impresora que vamos a utilizar, en este caso, una impresora modelo Ender 3 V3 SE que se selecciona en CURA. Una vez seleccionando la impresora, se procede a seleccionar los valores de las características como sigue:

Volumen de impresión: 220mm x 220mm x 250mm

Tipo de extrusor: La extrusora directa

"Sprite" de Ender 3 V3 SE permite una alimentación suave de varios filamentos, incluidos PLA, PETG y materiales flexibles TPU, que ya no se limitan a materiales de impresión.

Tipo de boquilla: Boquilla Creality de 0.4mm.

Altura de capa: Elegimos un valor bajo (como 0.1 mm) para obtener mayor detalle en el modelo del corazón.

Relleno: Configuramos el porcentaje de infill (relleno interno). En este caso usamos 20%

También es necesario ajustar la orientación del objeto a imprimir, lo que permite ahorrar material y sobre todo que la impresión tenga mejor soporte, el modelo se puede rotar y mover hacia diversos lados para que este dentro de los límites de nuestra impresora y no tenga ningún problema de movimiento, también es importante agregar un poco de pegamento en la base para que la impresora pueda comenzar su impresión sin problemas de movimiento. Se puede utilizar un soporte "Automático" o tipo "árbol". Para este caso en particular se decidió utilizar soportes de tipo "Automático"



Figura 2. Resultados de la impresión 3D de la imagen segmentada en la figura 1.

Análisis de Resultados

Durante el proceso de segmentación en 3D Slicer, enfrentamos algunas dificultades al intentar identificar y diferenciar las diversas estructuras anatómicas. Los huesos y los pulmones fueron relativamente fáciles de segmentar debido a las claras diferencias en sus densidades, lo que permitió utilizar herramientas como Threshold para identificarlos rápida y correctamente. Sin embargo, la segmentación de las estructuras cardíacas, en particular los bypass y algunas regiones del corazón, fue de mayor complejidad debido a la baja diferencia de densidad entre los tejidos. Esta similitud en las intensidades hizo que delimitar cada segmento fuera más complicado, especialmente para las áreas más pequeñas y delicadas, como los bypasses.

Durante la fase de impresión 3D en Ultimaker Cura, también se presentaron varias dificultades. En un primer intento, había demasiados hilos y las capas resultaban muy irregulares y desordenadas. En un segundo intento, logramos generar aproximadamente 30 capas regulares, pero después volvieron a aparecer problemas con la formación de hilos. Además, la primera capa de todas las impresiones salió muy delgada. Estos problemas pudieron haber sido causados por un ajuste inadecuado de parámetros como la velocidad de impresión o el relleno. Con nuestra tercera configuración, logramos generar capas más regulares, lo que mejoró la claridad de la impresión y permitió visualizar con precisión uno de los bypasses. Los otros dos, al ser más pequeños y estar menos a la vista, se vieron cubiertos por los soportes, lo que hizo que fuera difícil verlos incluso después de la refinación manual.

Discusión

Realizamos la impresión de un modelo de corazón con tres bypasses utilizando el método de Material Extrusión, en el cual el material se calienta y se extruye a través de una boquilla para construir el modelo capa por capa. Durante el proceso, aprendimos que cada material tiene un tipo de soporte interno que hace necesario el uso de boquillas con el diámetro exacto del material para hacer la extrusión. Además, comprendimos la importancia del manejo adecuado del software de impresión 3D, ya que este nos permite evaluar si contamos con suficiente material y estimar el tiempo total de impresión. Un aspecto clave fue la adición de soportes para garantizar la estabilidad del modelo. Si bien estos son esenciales para evitar su colapso, hay que colocarlos estratégicamente, ya que un exceso de soportes puede dificultar la visualización de detalles importantes. Una alternativa para optimizar su uso es modificar la orientación del modelo, de modo que se reduzca la cantidad de soportes sin comprometer la estabilidad de la impresión. Otro aspecto relevante fue la supervisión del proceso de impresión, al menos durante el primer tercio de la impresión total. En esta fase inicial es donde suelen presentarse los problemas derivados de una configuración inadecuada, como errores en la adhesión de capas o fallos en la extrusión del material. Una vez superada esta etapa, es menos probable que ocurran defectos graves en la impresión.

Conclusiones

La impresión 3D es una herramienta bastante útil pero tediosa. Se debe contar con un conocimiento profundo de las estructuras que se desean reproducir, como las anatómicas en proyectos de modelado de órganos, para asegurar que los mode-

los sean precisos y funcionales. Además, se debe prestar atención a las especificaciones técnicas de la impresora, como la velocidad de impresión, los soportes y la calidad, ya que pequeños errores en estos aspectos pueden comprometer el resultado final. En resumen, la impresión 3D es una gran manera de estudiar estructuras anatómicas y su ejecución requiere dedicación y paciencia para obtener los mejores resultados. Desde el punto de vista de la docencia, este enfoque de aprendizaje basado en la resolución de problemas permite comprender la segmentación y visualización de imágenes de manera directa.

Posteriormente a la ejecución de este proyecto, los resultados de la segmentación se pasaron a una impresora de resina con la cual fue posible visualizar más claramente los bypasses, gracias a los detalles que no se pudieron capturar por medio de la

impresora de filamento. Esto ayuda también a subrayar las ventajas y desventajas de cada técnica de impresión.

Referencias

1. Glasser, O. (1934). Wilhelm Conrad Röntgen and the Early History of the Roentgen Rays. Charles C. Thomas.
2. Mould, R. F. (1995). Radiology at the Turn of the Century. The British Journal of Radiology, 68(812), 1193-1214.
3. Kevles, B. H. (1997). Naked to the Bone: Medical Imaging in the Twentieth Century. Rutgers University Press.
4. Primer ECG
5. Waller, A. D. (1887). A Demonstration on Man of Electromotive Changes accompanying the Heart's Beat. Journal of Physiology, 8(5), 229-234.

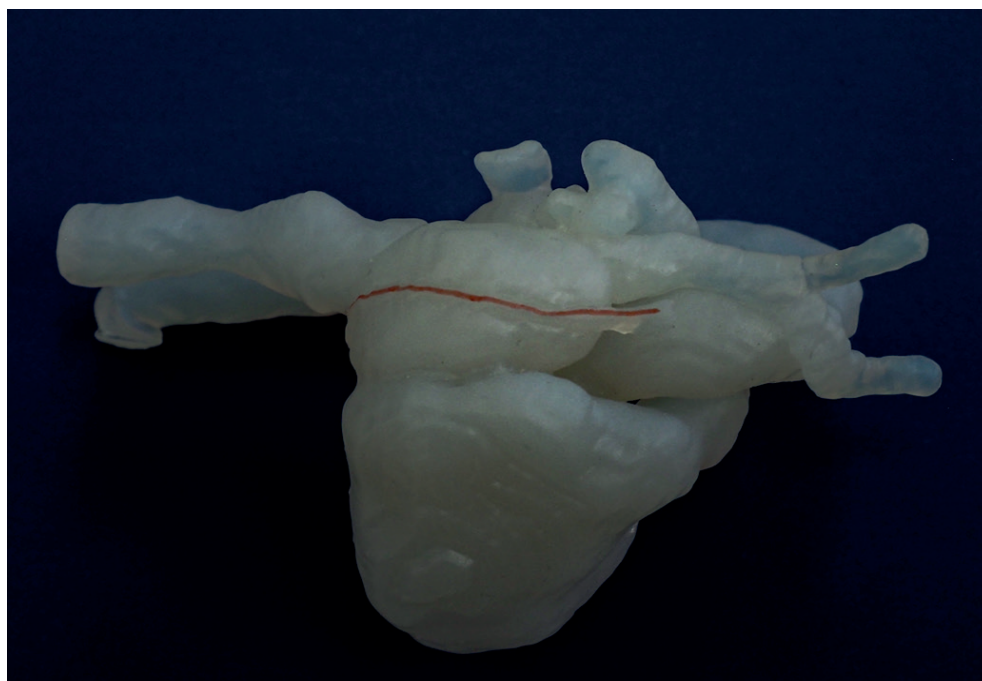


Figura 3 Impresión 3D en alta resolución empleando una impresora de resina de alta calidad

6. Einthoven, W. (1901). *Un nouveau galvanomètre*. Archives Néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles, 6, 625-633
7. Fye, W. B. (1994). A History of the Origin, Evolution, and Impact of Electrocardiography. The American Journal of Cardiology, 73(13), 937-949.
8. Hull, C. W. (1986). Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. U.S. Patent No. 4,575,330.
9. Cima, M. J., Sachs, E., & Yoo, J. (1994). Three-dimensional printing techniques for tissue engineering applications. Biomaterials, 15(6), 409-415.
10. Rengier, F., Mehndiratta, A., von Tengg-Kobligk, H., et al. (2010). *3D printing based on imaging data: Review of medical applications*. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 5(4), 335-341.
11. Mogali, S. R., & Gurung, S. B. (2021). Three-dimensional printing in medical education: A review of the current status and future perspectives. Anatomical Sciences Education, 14(5), 669-685.
12. Rengier, F., Mehndiratta, A., von Tengg-Kobligk, H., et al. (2010). *3D printing based on imaging data: Review of medical applications*. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 5(4), 335-341.
13. Bartlett, H. L., Smith, M. T., & Aktas, A. (2020). *Medical 3D printing and its impact on healthcare*. Journal of 3D Printing in Medicine, 4(3), 125-136.
14. Ventola, C. L. (2014). Medical Applications for 3D Printing: Current and Projected Uses. Pharmacy and Therapeutics, 39(10), 704-711.
15. Giannopoulos, A. A., Steigner, M. L., George, E., et al. (2016). *Cardiothoracic applications of 3D printing*. JACC: Cardiovascular Imaging, 9(11), 1287-1303.
16. Marro, A., Bandukwala, T., & Mak, W. (2016). Three-dimensional printing and medical imaging: A review of the methods and applications. Current Problems in Diagnostic Radiology, 45(1), 2-9.
17. Ciobotaru, V.; Tadros, V.-X.; Batistella, M.; Maupas, E.; Gallet, R.; Decante, B.; Lebre, E.; Gerardin, B.; Hascoet, S. 3D-Printing to Plan Complex Transcatheter Paravalvular Leaks Closure. J. Clin. Med. 2022, 11,
18. 4758. <https://doi.org/10.3390/>
19. Otton JM, Birbara NS, Hussain T, Greil G, Foley TA, Pather N. 3D printing from cardiovascular CT: a practical guide and review. Cardiovasc Diagn Ther 2017;7(5):507-526. doi: 10.21037/cdt.2017.01.12
20. Bertolini, M.; Rossoni, M.; Colombo, G. Operative Workflow from CT to 3D Printing of the Heart: Opportunities and Challenges. Bioengineering 2021, 8, 130. <https://doi.org/10.3390/>

Análisis numérico de una estructura de hueso trabecular bioinspirado



Resumen

El hueso trabecular es una estructura compleja y jerárquica que proporciona un soporte mecánico esencial y capacidad de carga al sistema esquelético humano. La arquitectura única del hueso trabecular, caracterizada por una red de estructuras interconectadas en forma de varillas y placas, permite una distribución eficiente de las tensiones y deformaciones. Este trabajo de muestra el proceso de diseño y análisis de una réplica de la geometría del hueso trabecular escaneada digital de una esponja mediterránea (Haliclona) debido a que ha ganado atención en el ámbito biomédico y de ingeniería de tejidos, el programa de cómputo Geomagic design X® y SolidWorks®. Se digitalizó la muestra, mediante una nube de líneas y puntos se procesaron y convirtieron en un modelo digital en 2D, que sirvió de base para la réplica de hueso trabecular. Las estructuras diseñadas se analizaron mediante software de análisis de elementos finitos para evaluar los patrones de tensión y desplazamiento en la condición de carga de peso de un paciente de 80 kg, la cual es una medida promedio en individuos de 43 años de edad [1]. Con el objetivo de imitar el comportamiento mecánico del hueso trabecular natural. Se realizaron 6 arreglos celulares con 36 geométricas escaneadas (círculo, elipse y amorfo), en un cuadrado de 11 mm por lado. Los resultados del estudio indican que las estructuras diseñadas presentaban patrones de tensión y desplazamiento similares a las presentadas por otros autores. La naturaleza anisotrópica de la arquitectura del hueso trabecular se replicó con éxito.

Palabras claves: Análisis numérico, hueso trabecular, bioinspirado, esponja Haliclona, mimetizado y biomédica.

Abstract

The trabecular bone is a complex, hierarchical structure that provides essential mechanical support and load-bearing capacity to the human skeletal system. The unique architecture of trabecular bone, characterized by a network of interconnected structures in the form of rods and plates, allows for the efficient distribution of stresses and deformations. This work shows the design and analysis process of a digitally scanned trabecular bone geometry replica of a Mediterranean sponge (Haliclona) because it has gained attention in the biomedical and tissue engineering field, the Geomagic design X® and SolidWorks® computer program. The sample was digitized using a cloud of lines, and points were processed and converted into a 2D digital model, which served as the basis for trabecular bone replication. The designed structures were analyzed using finite element analysis software to evaluate the stress and displacement patterns in the weight-bearing condition of an 80 kg patient, which is an average measurement in 43-year-old individuals [1]. Aiming to mimic the mechanical behavior of natural trabecular bone. Six cellular arrays were made with 36 scanned geometries (circle, ellipse, and amorphous), in a square of 11 mm per side. The results of the study indicate that the designed structures presented stress and displacement patterns similar to those given by other authors. The anisotropic nature of the trabecular bone architecture was successfully replicated.

Keywords: Numerical analysis, trabecular bone, bioinspired, Heliclone sponge, mimicry and biomedical

1. Introducción.

La réplica de la arquitectura tridimen-

sional del hueso trabecular, a través de bioinspiración, es una alternativa ortopédica prometedora en el tratamiento de enfermedades; osteoporosis, obesidad, la osteomalacia, las infecciones óseas, la pseudoartrosis, los tumores y las enfermedades degenerativas, las cuales causan dependencia y merman la calidad de vida de las personas [2]. Así mismo las fracturas de huesos largos como la tibia y fémur, son las lesiones más frecuentes en traumatología, provocado por accidentes de tránsito, impactos con otros cuerpos, violencia física, caídas, accidentes deportivos entre otras causas. Sin embargo, frecuentemente la solución a estos problemas no es la adecuada, debido a la falta de acceso inmediato a sistemas biomecánicos económicos (Prótesis), ya que la mayoría son importados, son implantes estandarizados con al fenotipo de pacientes de los países fabricantes de prótesis y por ende una dificultad para ajustar el implante con el hueso [3].

Por otro lado, las limitaciones de las prótesis convencionales, tales como, el desgaste, las infecciones, el módulo de elasticidad entre los materiales y el hueso provocan tensión local en el sitio de fijación y pueden llegar atrofiar el tejido óseo, debido a su diferencia con respecto al hueso. Por lo que el diseño de insertos para prótesis articulares personalizados utilizando su estructura geométrica bio-inspirada en su naturaleza, es un campo en constante crecimiento debido a la demanda de soluciones más efectivas y duraderas en el ámbito de la ingeniería biomédica, ofreciendo una oportunidad innovadora para la fabricación de insertos ortopédicos.

La estructura geométrica del hueso esponjoso, está formado por un sistema

trabecular, cuya función es suministrar médula ósea, imprescindible para el desarrollo y almacenamiento de las células sanguíneas. El hueso es un tejido vivo que se encuentra en continuo proceso de crecimiento sujeto a procesos bioquímicos, biofísicos y biológicos relacionados entre sí y con sus propiedades mecánicas y geométricas [4].

La estructura porosa y esponjosa del hueso trabecular que conforma el interior de los huesos largos, presenta una compleja e intrincada estructura tridimensional de trabéculas óseas ramificadas, que forman un sistema de espacios intercomunicados. Dentro de cada trabécula se encuentra médula ósea, integrada principalmente por células madre, que producen glóbulos rojos (transportadores de oxígeno) y plaquetas (coaguladores de sangre), además de las células que reciben directamente los nutrientes de la sangre que circula por las cavidades medulares [5].

Esta arquitectura ha sido tema de interés desde hace tiempo por parte de los investigadores que buscan reproducir sus propiedades deseables en materiales y estructuras para aplicaciones ortopédicas e ingeniería. Se han desarrollado métodos bioinspirados para reproducir la compleja geometría del hueso trabecular. La modelización y la simulación numérica computacional ha sido fundamentales para comprender las propiedades biomecánicas del hueso trabecular y orientar el diseño de estructuras biomimétizadas. Estas técnicas numéricas permiten evaluar la resistencia ósea, la carga articular y otros parámetros difíciles de medir experimentalmente [6]. El uso de sistemas de manufactura avanzados como las tec-

nologías de prototipado rápido (RP) ha permitido la fabricación de estructuras intrincadas y jerárquicas inspiradas en el hueso trabecular personalizadas [7].

Los huesos bioinspirados, al replicar la configuración natural y las características mecánicas del tejido óseo, crean un entorno favorable para la regeneración ósea, resultando en un sustituto óseo eficiente y perdurable. Los investigadores han indagado en una amplia variedad de fuentes naturales de inspiración para replicar la forma, geometría, tamaño y disposición de los poros presentes en el hueso sano. Por ejemplo, el tejido trabecular humano en un estado saludable presenta espacios óseos elipsoidales de dimensiones determinadas, los cuales contienen una cantidad considerable de osteocitos [8].

Estudios se han centrado en el rediseño optimizado para crear estructuras porosas radiales bioinspiradas, adecuadas como absorbedores de energía, e implantes en aplicaciones biomecánicas.

Las estructuras escalonadas fueron fabricadas utilizando tecnología 3D, realizando ensayos de compresión a las muestras. El trabajo realizado por Khalegh Kouhi-Lakeh y colaboradores adopta un método híbrido de diseño generativo basado en la topología de un programa de cómputo y un método teórico paramétrico, el enfoque propuesto se centra en el diseño conceptual de estructuras bioinspiradas cilíndricas de pared delgada con diferentes patrones graduales y permite crear diferentes geometrías, analizarlas mecánicamente y clasificarlas. Para evaluar sus propiedades mecánicas de compresión y su comportamiento ante fallos,

se les ha aplicado simultáneamente un enfoque numérico y experimental, verificando y validando resultado por medio de análisis de elementos finitos (FEA) [9].

El autor Zenyang Li y colaboradores utilizaron una metodología de teselación de Voronoi variable periódica (VPVT) para el diseño bioinspirado de estructuras porosas. El método utiliza puntos distribuidos definidos por una función variable-periódica la cual genera patrones de teselación de Voronoi. Este trabajo propone un nuevo método de teselación periódica variable de Voronoi (VPVT) para diseñar y optimizar estructuras porosas bioinspiradas. Se demostró que este concepto de diseño VPVT propuesto puede proporcionar un medio genérico para crear patrones porosos bioinspirados sin ninguna limitación obvia en el contexto anterior, al tiempo que garantiza de forma natural la capacidad de adaptación multiescala y la conectividad. El patrón poroso imita la estructura celular irregular de la naturaleza, es decir, el hueso trabecular, logrando unas propiedades y un rendimiento avanzados del material. El método propuesto es aplicable a problemas de optimización multiescala tanto micro-macro como meso-macro, por ejemplo, implantes biomédicos, soportes de puentes y soportes arquitectónicos [10].

Otros autores como Yin Zhou y colaboradores utilizaron modelos porosos basados en la teselación de Voronoi y operaciones booleanas, intentando imitar la estructura del hueso trabecular a diferente porosidad. Las propiedades mecánicas de las estructuras se evaluaron mediante estimaciones analíticas, simulaciones numéricas y ensayos experimentales de compresión de versio-

nes impresas en 3D de las estructuras. Los modelos ofrecieron la posibilidad de proporcionar interconectividad de poros a porosidades relativamente bajas, así como estructuras en forma de placa y de varilla [11]. Eddie N. Armendáriz utilizó la ingeniería bioinspirada generando patrones de teselación de Voronoi mediante un algoritmo para la creación de estructuras porosas irregulares. Los resultados indican que las propiedades mecánicas dependen directamente de las características microestructurales de la propia estructura porosa. Además, el área superficial y la porosidad son los principales parámetros para controlar, el algoritmo utilizado tiene una aplicación para la industria automotriz y aeroespacial [12]. Haja-Sherief uso el método de Teselación de Voronoi para la creación de estructuras porosas aleatorias de diferentes tamaños (19,8 μm a 923 μm) similares a la estructura del hueso trabecular. Realizarón una simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD) basada en el método de los elementos finitos en todos los andamiajes Voronoi diseñados para predecir las caídas de presión y la permeabilidad del comportamiento del flujo sanguíneo no newtoniano utilizando el modelo de fluido de ley potencia [13].

Diversos trabajos han reportado el desarrollo de estructuras celulares bioinspiradas de los huesos del fémur utilizando cuatro tipos distintos de células: en forma de panal hexagonal, reentrantes, híbridas e híbridas jerárquicas. Se revelaron algunas características clave, como la carga elástica máxima, la carga de meseta, la capacidad de absorción de energía, la relación de Poisson y el efecto del tamaño de las células jerárquicas. Demostraron

que las nuevas estructuras bioinspiradas superaban el rendimiento de absorción de energía de los diseños tradicionales[14].

Marcin Lipowiecki y Dermot Brabazon replicó la geometría de andamios óseos en forma de poros mediante el diseño de tres celdas unitarias que incluían estructuras de forma cubica, triangular y hexagonal poliédrica. Los poros del andamio diseñado se variaron de 120, 340 y 600 μm , concluyendo que los macroporos deben tener un diámetro mínimo de 100 μm para que las células puedan proliferar dentro de la estructura. Los modelos con las diferentes medidas desarrolladas indicaron restricciones geométricas con el fin de adaptar los andamiajes a las necesidades específicas de los pacientes [15].

El objetivo es construir un modelo del hueso trabecular bioinspirado por la esponja Haliclona utilizando herramientas CAD/CAE, escáner digital y un programa de cómputo de procesador de imágenes con fines de aplicaciones ortopédicas, además de elaborar un modelo matemático que describa la secuencia y estructura de las trabéculas para su posterior comparación de los valores en desplazamiento y tensión de von Mises obtenidos a partir de simulaciones de análisis de elementos finitos de la geometría del hueso trabecular y el material UHMWPE.

2. Materiales y métodos.

Se utilizó una esponja Haliclona Mediterránea (*Chondrosia reniformis*) comercial. Esto debido a que su estructura porosa permitirá el paso de fluidos y nutrientes semejante a la de los huesos trabeculares. La facilidad de manipulación debido al tamaño de sus poros, mejorando la calidad en el escaneado y modelado

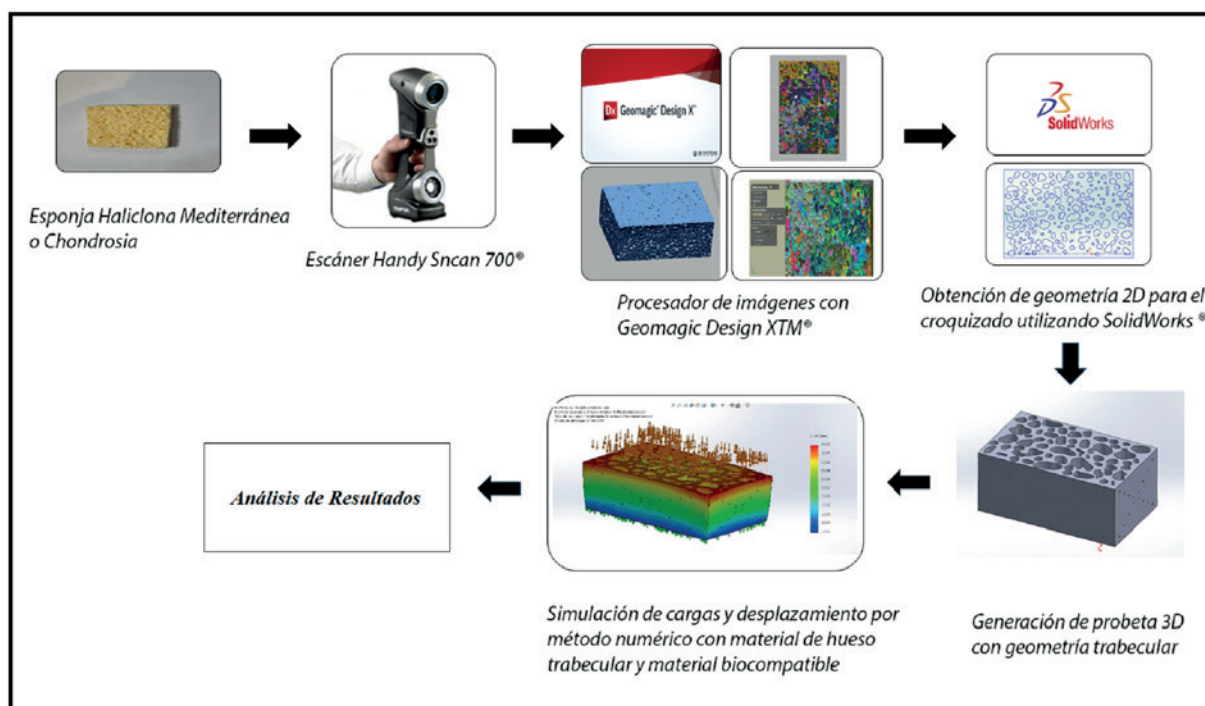


Figura 1. Proceso de elaboración de la réplica de la estructura trabecular.

de su estructura. La esponja utilizada fue de forma rectangular con dimensiones de 15x10x5 cm para obtener a detalle las geometrías superficiales a través de un escaneado 3D. Se utilizó un escáner de la marca Handy Scan 700® para digitalizar la superficie de la esponja y obtener la parametrización de las geometrías que serán aplicadas a la generación de la formación trabecular y analizar sus propiedades mecánicas.

El diagrama de flujo que se muestra en la figura 1, indica el proceso de generación de las geometrías trabeculares con las herramientas computacionales.

El primer paso consiste en el escaneado 3D de la esponja Haliclona mediterránea para capturar la geometría superficial de la esponja. Se utilizó una resolución de medición de 0.1 mm (hasta una resolución de 0.025 mm) y una malla

de 0.5 mm (de hasta 0.1 mm de resolución). Para capturar los detalles de la superficie de la esponja y el tamaño de procesamiento de los archivos para ser manipulados en una computadora personal con las características; core i7, 48 GB de memoria RAM y 16 núcleos.

A continuación, los datos de escaneado 3D adquiridos se procesan y reconstruyen mediante el programa de cómputo Geomagic Design X®. Se generó un mapa de tamaño rectangular con las estructuras geometrías extraídas de la esponja como se muestra en la figura 2.

Una vez adquiridos los datos 3D y procesarlos con el programa de cómputo Geomagic Design X®. Se identificaron y clasificaron las principales geometrías que forman la estructura de la esponja como; círculos, elipses y figuras irregulares mostrados en la figura 3.

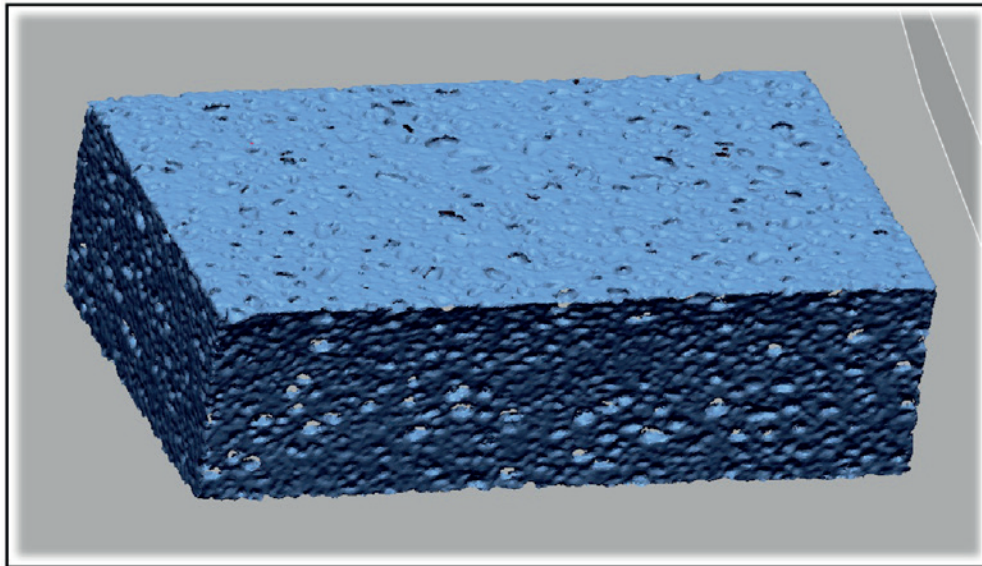


Figura 2. Mapa superficial de la estructura de la esponja mediterránea.

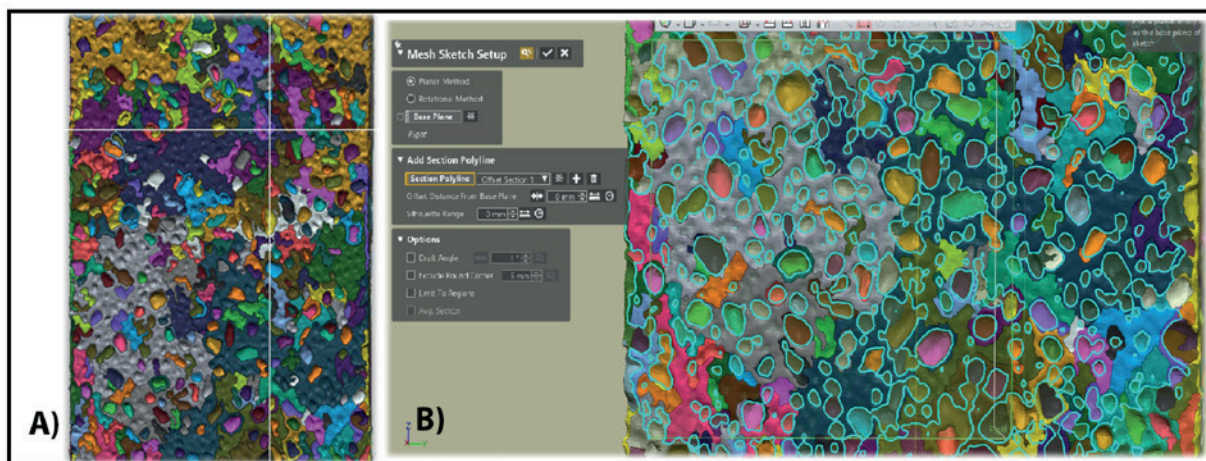


Figura 3. Procesamiento de imagen mediante el programa de cómputo Geomagic Design X®.

A) Segmentación y alineación ejes superficiales con mayor área de la esponja.

B) Aplicación de la herramienta Sketch para obtenerlas geometrías sobresalientes.

Para realizar la mimetización del hueso trabecular se agruparon células estructuradas por tres principales geometrías observadas (Círculo, elipse e irregular). (Ver figura 4)

Una variable fundamental que varios autores toman en cuenta al desarrollar la réplica del hueso es la densidad, sin embargo en una primera etapa de investigación

no se consideró aplicar un porcentaje de densidad y se optó por dejarlo a la distancia original entre geometrías de la estructura de la esponja y observar su comportamiento mecánico [8, 9, 13].

Finalmente, para generar la estructura trabecular en 3D, fue con la herramienta del programa de cómputo SolidWorks®.

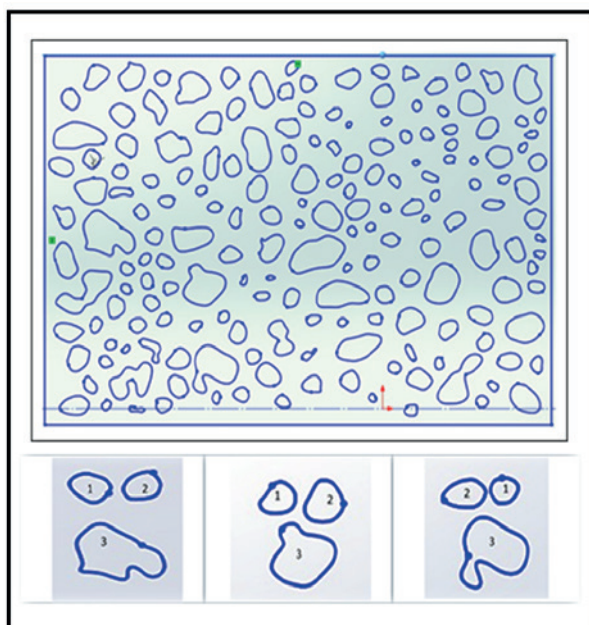


Figura 4. Sketch exportado a SolidWorks® para la creación del coquizado. Las figuras identificadas son: 1. Círculos, 2. Elipses y 3. Figuras irregulares.

Mediante la generación del Sketch, exportado del programa Geomagic Design X®. Se realizaron 6 arreglos celulares con 36 geométricas escaneadas (Círculo, elipse y amorfo), en un cuadrado de 11 mm por lado como se observa en la figura 5.

A los arreglos se les aplicó una operación booleana utilizando esferas de 8 mm de diámetro. Esto con el fin de hacer la estructura lo más parecida al hueso esponjoso. Otros autores utilizan patrones de teselación de Voronoi [11, 12, 13].

Se creó un rectángulo de 66 mm de largo por 44 mm de alto. Se ensamblaron y repitieron a lo largo y ancho para formar la estructura presentada en la figura 6.

2.1 Caso de Estudio y condiciones frontera.

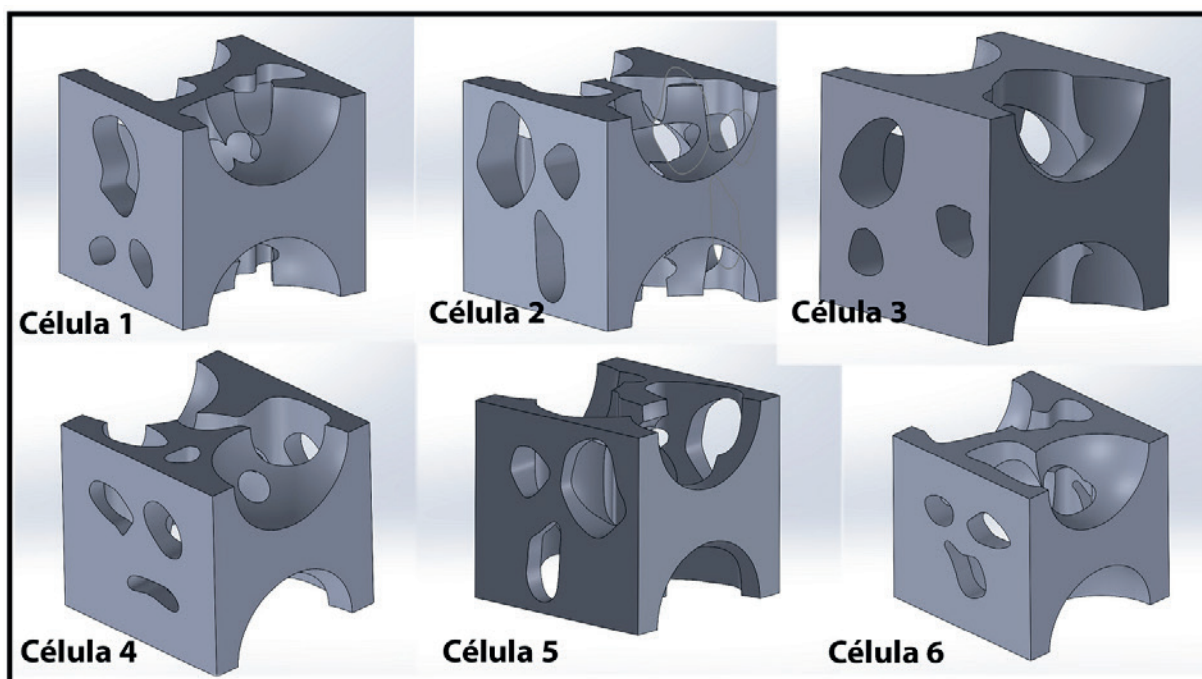


Figura 5. Arreglo uní-celdas en bloques de 11 mm por lado para armar una estructura trabecular de la dimensión que se requiera.

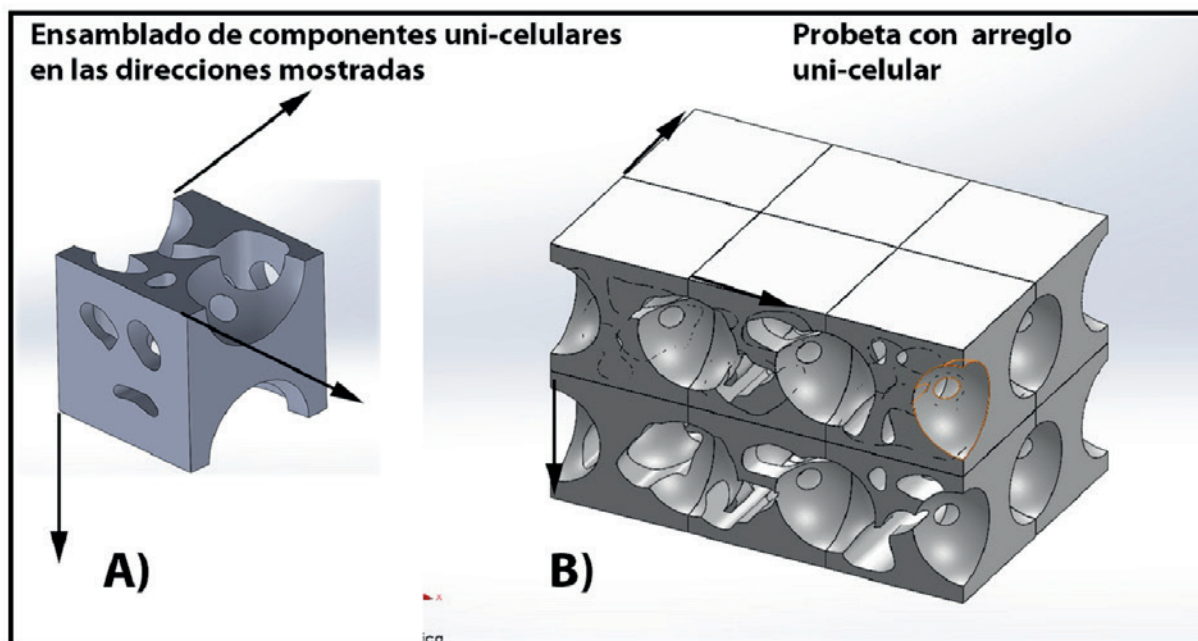


Figura 6. Arreglo de células a lo largo de los ejes X, Y y Z, las flechas indican la dirección de ensamblado para formar el rectángulo de réplica del hueso trabecular. A) Célula unitaria. B) Utilización de la Herramienta matriz de componente lineal para generar la probeta de réplica del hueso trabecular.

Se realizó un análisis numérico en un ensamble de 12 células, se le aplicó una carga de Se aplicó una carga de 80 kg trasformada en fuerza de 784.53 N en la parte superior del arreglo celular, tomando como una persona durante el ciclo caminata, las sujeciones se colocaron en la parte inferior mostrados en la figura 7.

Se tomaron las propiedades del hueso trabecular y del Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE), obtenidos de referencia bibliográfica y mostrados en la tabla 1 [4, 3].

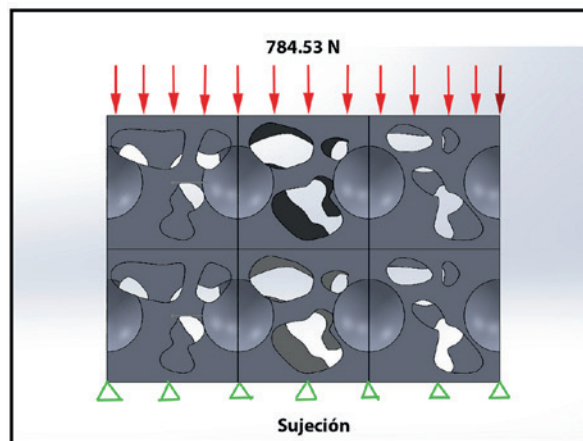


Figura 7. Diagrama de cuerpo libre caras de aplicación y fuerza.

Material	Módulo Elástico [MPa]	Coefficiente de Poisson	Densidad [Kg/m ³]	Límite elástico. [MPa]
Hueso trabecular	15000	0.3	330	6.76
UHMWPE	1080	0.394	450	33

Tabla 1. Principales propiedades mecánicas del hueso trabecular y del UHMWPE.

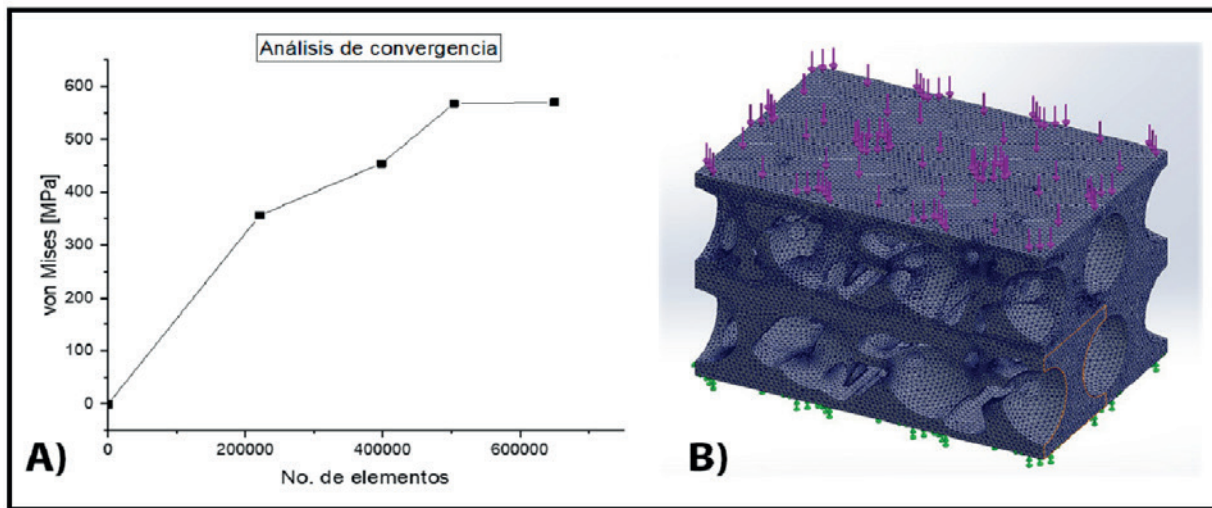


Figura 8. Análisis de convergencia con un total de 752820 elementos.

Para el mallado del arreglo se aplicó uno basado en curvaturas con elementos cuadráticos de alto orden debido a la geometría interna, se realizaron análisis con un tamaño de elemento de 0.47 mm, 0.72 mm, 1 mm y tamaño estándar.

3. Discusión y resultados.

Se aplicó un análisis de sensibilidad de malla para determinar el número de elementos necesarios y obtener resultados confiables (ver figura 8).

Se analizó el comportamiento mecánico de la estructura trabecular, comparando el desplazamiento y la tensión de von Mises entre los dos materiales; Hueso trabecular y UHMWPE [16]. Los resultados mostraron que el modelo de hueso trabecular presentaba un desplazamiento máximo de 0.160 mm, y esfuerzo de von Mises de 1011.57 MPa, mientras que el modelo de UHMWPE muestra un mayor desplazamiento de 0.645 mm, pero un mucho menor concentrador de tensiones de 384.11 MPa (Ver figura 9).

La figura 10 muestra los desplazamien-

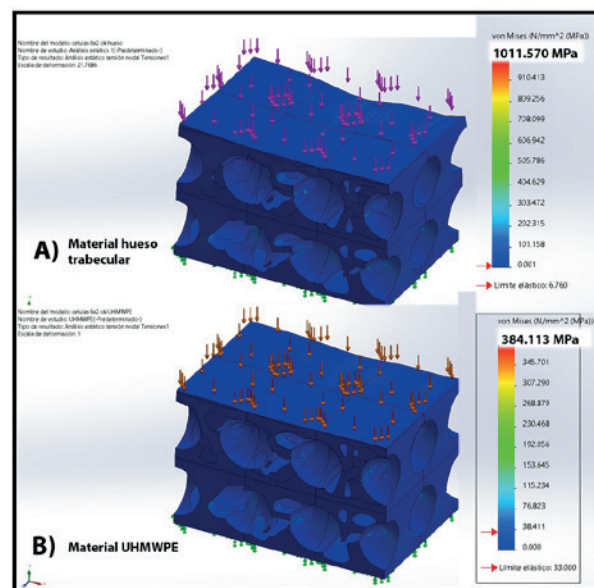


Figura 9. Esfuerzo de von Mises de las probetas utilizando las propiedades del:

- A) hueso trabecular,
- B) Del material UHMWPE.

tos con los materiales del hueso trabecular y el UHMWPE.

Los resultados de desplazamiento y concentración de esfuerzos sugieren que la geometría propuesta del hueso trabecular proporciona una excelente capacidad de

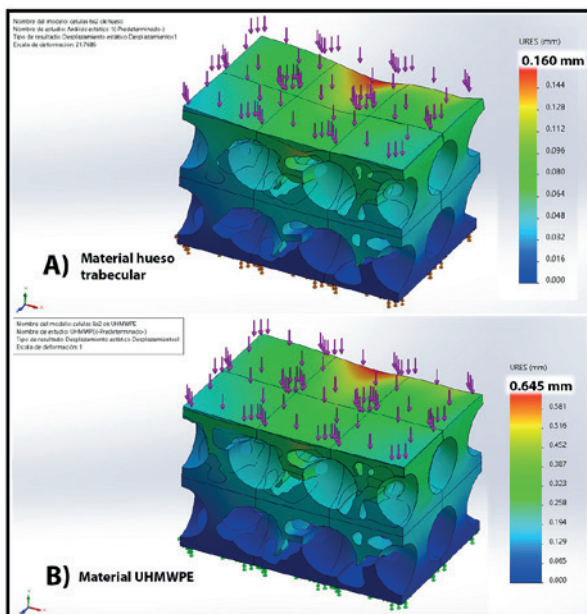


Figura 10. Desplazamiento en unidades milimétricas de las probetas utilizando las propiedades del: A) hueso trabecular; B) Del material UHMWPE.

carga con ambos materiales propuestos. Los valores de menor rigidez y mayor desplazamiento observados con el material de UHMWPE indica su capacidad superior para absorber deformaciones y distribuir esfuerzos, manteniendo la integridad estructural debido a la anatomía del sujeto de estudio. Como consecuencia a la alta capacidad elástica del polietileno [3].

La compleja morfología del hueso trabecular permite el crecimiento interno de células óseas, lo que puede contribuir a mejorar la estabilidad de los implantes en el hueso [17]. Por lo que una meta principal es replicar estas formas, con el uso del material de UHMWPE, dando lugar a una distribución uniforme de la tensión dentro de la interfaz implante-hueso, lo que puede comprometer potencialmente la estabilidad y el rendimiento a largo plazo del implante.

Cabe señalar que la réplica del hueso trabecular hasta hoy en día no se ha podido realizar de forma precisa, debido a la complejidad de las estructuras y el no seguir un patrón establecido, definiéndolo como un sistema caótico [9].

4. Conclusiones

El análisis del desplazamiento y la distribución de esfuerzos del arreglo celular propuesto, es un indicador en el rendimiento para aplicaciones en los implantes ortopédicos.

Este estudio se destaca la importancia de tener en cuenta la geometría del hueso trabecular y sus propiedades mecánicas a la hora de rediseñar y optimizar la réplica de hueso trabecular. Al comprender la compleja interacción entre la estructura versus comportamiento mecánico, por lo que existe un área de oportunidad a desarrollar estrategias más eficaces para promover la osteointegración exitosa y la estabilidad del implante a largo plazo.

El mayor módulo elástico del primer material (hueso trabecular) dará lugar a un campo de tensiones más concentrado, lo que conducirá a la formación de concentración de tensiones localizadas. Estas concentraciones de esfuerzos pueden ser problemáticas, ya que pueden aumentar significativamente la probabilidad de fallo del material, especialmente en zonas donde las características geométricas o las condiciones de carga amplifican los niveles de esfuerzos de tensión. Para la aplicación de implantes ortopédicos o placas de fractura sería riesgoso debido a la falla del material por fatiga.

Por el contrario, el material de módulo elástico más bajo (1 GPa correspondien-

te al UHMWPE) mostrará una distribución de esfuerzos uniforme, con picos de esfuerzos más bajos y un menor riesgo de falla localizada.

Estos hallazgos tienen importantes implicaciones para el diseño y la selección de materiales en implantes ortopédicos. Al aprovechar las propiedades mecánicas del hueso trabecular, los diseños pueden optimizarse para imitar mejor las capacidades naturales de soporte de carga del tejido óseo, lo que potencialmente conduce a mejores resultados a largo plazo para los pacientes. En resumen, la estructura porosa similar a la trabecular puede reducir eficazmente el módulo elástico similar al UHMWPE, evitando así la concentración de esfuerzos y favoreciendo la adhesión y proliferación de osteoblastos (osteointegración).

Los estudios futuros implicarán el uso de materiales alternativos, como el PEEK o resinas biocompatibles para impresión de probetas y realizar pruebas a compresión. Aplicado el diseño de sistemas de osteosíntesis para el tratamiento de fracturas óseas con la aplicación de estructuras porosas diseñadas por bioinspiración [18].

Agradecimientos.

A la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Unidad Zacatenco por la oportunidad de realizar la Estancia Posdoctoral de Investigación, CONAH-CYT por el apoyo con No. 2272966. Así como al Instituto Politécnico Nacional, la Universidad Autónoma Metropolitana y a la SECTEI, por el financiamiento otorgado en el proyecto de Consorcio UAM-IPN-SECTEI “Desarrollo numérico experimental de lesión de médula espinal

implantada con polímero derivado del pirrol mediante DTI y MRS en murinos.”

Referencias.

- [1] Ignacio Osuna-Ramírez, M en CI; Bernardo Hernández-Prado, Julio César Campuzano, Dr en CII; Jorge Salmerón,, «Índice de masa corporal y percepción de la imagen corporal en una población adulta mexicana: la precisión del autorreporte,» *Salud Publica de México*, vol. 48, n° 2, pp. 94-103, 2006.
- [2] Federica Buccino , Irene Aiazzi, Alessandro Casto, Bingqi Liu, Maria Chiara Sbarra, Giovanni Ziarelli, Laura Maria Vergani * and Sara Bagherifard, «Down to the Bone: A Novel Bio-Inspired Design Concept,» *Materials*, pp. 2-18, 2021.
- [3] Tomas de la Mora ramírez, Tesis Doctoral, Cd de México: Universidad Autónoma del Estado de México, 2020.
- [4] Miguel Ángel Flores Rentería, Martín Ortiz Domínguez, Arturo Cruz Avilés y Francisco López Sánchez, «LA MECÁNICA DEL HUESO, UNA REVISIÓN DE LOS MODELOS DE REMODELACIÓN ÓSEO,» *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún*, vol. 5, pp. 2-16, 2018.
- [5] Georg Osterhoff , Elise F Morgan , Sandra J Shefelbine , Lamya Karim , Laoise M McNamara y Peter Augat, «Bone mechanical properties and changes with osteoporosis,» *National Library of Medicine*, vol. 47, n° 2, pp. 2-26, 2016.
- [6] Chafra, Moez & Ben Kahla, Rabeb & Barkaoui, Abdelwahed, «Cell Interac-

- tion and Mechanobiological Modeling of Bone Remodeling Process,» de *Bio-mechanics and Functional Tissue Engineering*, Rijeka, Intech Open, 2021, pp. 1-18.
- [7] Ansari, A.I., Sheikh, N.A., «Bone Tissue Regeneration: Rapid Prototyping Technology in Scaffold Design,» *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, vol. 103, n° 6, pp. 1303-24, 2022.
- [8] Greta Dei Rossi, Laura Maria Vergani, and Federica Buccino, «A Novel Triad of Bio-Inspired Design, Digital Fabrication, and Bio-Derived Materials for Personalised Bone Repair,» *MDPI, Materials*, vol. 17, n° 21, pp. 2-38, 2024.
- [9] Khalegh Kouhi-Lakeh, Mohsen Teimouri, Masoud Asgari, «Bio-inspired topology optimization driven design for 3D printed radially graded meta-structures; Design, modeling and mechanical characteristics,» *Composite Structures*, vol. 346, pp. 15-40, 2024.
- [10] Zeyang Li, Sheng Chu, Zhangming Wu, «A novel bio-inspired design method for porous structures: Variable-periodic Voronoi tessellation,» *Material and Design*, vol. 243, pp. 16-40, 2024.
- [11] Yijun Zhou, Per Isaksson y Cecilia Persson, «An improved trabecular bone model based on Voronoi tessellation,» *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 148, 2023.
- [12] Eddie N. Armendáriz-Mireles, Francisco D. Raudi-Butrón, Melissa A. Olvera-Carreño y Enrique Rocha-Rangel, «Design of bio-inspired irregular porous structure applied to intelligent mobility products,» *Revista científica Nexo*, vol. 36, 2023.
- [13] Walker, Haja-Sherief N. Musthafa and Jason, «Design of Trabecular Bone Mimicking Voronoi Lattice-Based Scaffolds and CFD Modelling of Non-Newtonian Power Law Blood Flow Behaviour,» *MDPI*, vol. 12, n° 12, 2024.
- [14] Nguyen Dinh Khoa, Rajendra Prasad Bohara, Abdallah Ghazlan, Huu-Tai Thai, «Novel hierarchical bioinspired cellular structures with enhanced energy absorption under uniaxial compression,» *Aerospace Science and Technology*, vol. 147, pp. 2-35, 2024.
- [15] Marcin Lipowiecki, Dermot Brabazon, «Design of Bone Scaffolds Structures for Rapid Prototyping with Increased Strength and Osteoconductivity,» *Advanced Materials Research*, vol. 83, n° 86, pp. 914-22.
- [16] Diana Reboledo-Grau y Gabriela Martínez-Borde, «Metodología para el diseño computacional de andamios a ser utilizados en reparación ósea,» *Revista Ingenierías*, vol. 19, n° 4, pp. 301-14, 2020.
- [17] A. J. Ř. Tomáš Krejčí, «Homogenization of trabecular structures,» *MATEC Web of Conferences*, pp. 1-9, 2020.
- [18] Bankole I. Oladapo, S. Abolfazl Zahedi, Sikiru O. Ismail, «3D printing of PEEK and its composite to increase biointerfaces as a biomedical material- A review,» *ELSEIVER*, vol. 203, pp. 2-25, 2021.

