

TECING

ISSN: EN TRÁMITE

Año 2025, Vol. 1, No. 1 MARZO 2025 | AGOSTO 2025



<https://tecing.org>



Año 2025, Vol. 1, No. 1 MARZO 2025 | AGOSTO 2025

Consejo Editorial

Universidad Autónoma del Estado de México

Director Editorial: Javier Salas García

Editora Científica: Ruth Hernández Pérez (gestión de revisión por pares)

Editor Técnico: Miguel Armando Moran González (producción editorial)

Comité Científico

Álvarez Sánchez, Ervin Jesús – Universidad Veracruzana, Región Xalapa, (UV) México

Carbajal-Degante, Erik – Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México

Flores Cuatle, José de Jesús Agustín – Instituto Tecnológico de Orizaba (TecNM Campus Orizaba), México

Gómez Ramos, José Luis – Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), México

Hernández López, Francisco Miguel – Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez (TECMM) Jalisco, México

Hernández Oliva, Noemi – Instituto Politécnico Nacional (IPN), México

Hernández Paxtián, Zulma J. – Universidad de la Cañada (UNCA), México

Hernández Villegas, Mario Antonio – Universidad Autónoma de Coahuila (UADEC), México

Lerma Sánchez, Ángel Mario – Universidad Autónoma de Tamaulipas (UAT), México

Rojas, Julio César – Instituto Tecnológico Superior de Acatlán de Osorio (ITSAO) Puebla, México

TECING, año 2025, Volumen 1, Número 1, marzo 2025 – agosto 2025, es una revista de publicación semestral editada por Javier Salas García, Toluca, Estado de México, C.P. 50100, México. Tel. (722) 7595572, <http://tecing.org>, contacto@tecing.org. Editor Responsable: Javier Salas García. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo número 04-2026-011213430900-102 otorgado por el Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR). ISSN: en trámite. Responsable de la última edición: Javier Salas García. Fecha de última modificación: 30 de agosto de 2025.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente representan la postura de la Dirección Editorial de la revista. Se permite la reproducción total o parcial del contenido sin fines de lucro, siempre y cuando no se realicen modificaciones y se cite la fuente completa. Esta publicación es realizada en México por Javier Salas García; todos los derechos están reservados en el año 2025. Esta obra cuenta con una Licencia de Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.



Carta Editorial	<i>Salas-García, J.</i>	3
¿Cómo se usa la electricidad para limpiar el agua?		
How is electricity used to clean water?		4
<i>Salas-García, J., Portillo-Rodríguez, O., Martínez Mendez, R., Martínez-Mendez, R.</i>		
Bases físicas de cómo fabricar órganos de gelatina con bioimpresión 3D		
Physical principles behind fabricating gelatin organs with 3D bioprinting		12
<i>Valenzuela-Reyes, M. B., Martínez-Pérez, C. A., Zúñiga-Aguilar, E. S.</i>		
Divulgación creativa y amigable: Educación ambiental y emprendimiento		
Creative and friendly outreach: Environmental education and entrepreneurship		19
<i>González-Palomares, S.</i>		
Desarrollo de una aplicación móvil interactiva para la prevención de la degradación auditiva		
Development of an interactive mobile application for the prevention of hearing loss		25
<i>Caballero-Hernández, H., Muñoz-Jiménez, V., Ramos-Corchado, M. A.</i>		
Residuos electrónicos como fuente secundaria de tierras raras		
Electronic waste as a secondary source of rare earth elements		36
<i>Martínez-Montoya, P. A., Jiménez-Romero, T. d. R., Carreja-Jota, M. L., Morales-Ramírez, A. d. J.</i>		
Amortiguadores de fluido viscoso para reducir las vibraciones provocadas por el viento en edificios altos		
Fluid viscous dampers to reduce wind-induced vibrations in tall buildings		41
<i>Bañuelos-García, F., Dionisio-Aguilar, A. M. O.</i>		
¿Cómo medir la variabilidad de la frecuencia cardíaca en una mamá en constante movimiento?		
How to Measure Heart Rate Variability in a Mom in Constant Motion?		50
<i>Gonzalez-Lopez, D. I., Martínez-Mendez, R., Rodríguez-Arce, J., Zúñiga-Avilés, L. A.</i>		

Es un honor presentar el primer número de *TECING* (*Tecnología, Electrónica, Computación e Ingeniería*), una nueva revista de divulgación científica que nace con el propósito de conectar el mundo universitario con las nuevas generaciones. Esta iniciativa busca fomentar vocaciones científico-tecnológicas y servir como puente para estudiantes de educación media superior y público general interesado en la ciencia aplicada.

TECING presenta proyectos estudiantiles y desarrollos tecnológicos en áreas clave como electrónica, computación, telecomunicaciones, mecatrónica e ingeniería en todas sus ramas. Nuestra misión es clara: facilitar la comprensión de las carreras profesionales de ingeniería y demostrar que la ciencia es accesible y transformadora.

Creemos firmemente que el conocimiento debe ser libre. Por ello, TECING es una publicación de acceso abierto bajo la licencia *Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0*. Esto permite a la comunidad global acceder, compartir y beneficiarse de los proyectos e investigaciones publicados de manera inmediata y gratuita, apoyando así la formación vocacional de los jóvenes.

Los autores conservan sus derechos de autor y nos otorgan el privilegio de ser la primera publicación de su trabajo, garantizando siempre la protección de datos personales y el rigor científico a través de un cuidadoso proceso de revisión editorial.

En nuestras páginas encontrarán una diversidad de contenidos que van desde artículos de proyectos estudiantiles y casos de estudio, hasta entrevistas con profesionales destacados y experiencias educativas innovadoras. Buscamos calidad técnica sin perder la claridad y relevancia educativa.

Atentamente,

Dr. Javier Salas García

Director Editorial. Revista TECING

Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de México



¿Cómo se usa la electricidad para limpiar el agua?

How is electricity used to clean water?

Salas-García, J.^{1*}  , Portillo-Rodríguez, O.¹  , Martínez-Mendez, R.¹ 

Historial del artículo

Recibido: 16-may-2025

Aceptado: 10-jul-2025

Disponible en línea: 30-ago-2025

Palabras clave

ES: Electrocoagulación, Electroflotación, Tratamiento de agua, Electrólisis, Contaminantes

EN: Electrocoagulation, Electroflotation, Water treatment, Electrolysis, Contaminants

RESUMEN

El agua contaminada afecta la salud y el ambiente de millones de personas. Los métodos tradicionales de tratamiento dependen de agregar sustancias químicas como coagulantes para separar la suciedad del agua. Sin embargo, estos métodos aumentan los costos operativos y generan lodos que pueden ser peligrosos. Este artículo presenta la electrocoagulación y electroflotación como alternativa basada en electricidad. Estas técnicas usan corriente eléctrica entre placas metálicas para generar los agentes necesarios para retirar contaminantes. Se forman iones que juntan partículas pequeñas y burbujas de gas que hacen flotar los contaminantes hacia la superficie. Los beneficios incluyen reducción del uso de químicos, menor generación de lodos y adaptabilidad a distintos contaminantes. Estas tecnologías tienen potencial para combinarse con energía renovable y aplicarse en comunidades con menos infraestructura.

ABSTRACT

Contaminated water affects the health and environment of millions of people. Traditional treatment methods depend on adding chemical substances such as coagulants to separate dirt from water. However, these methods increase operating costs and generate sludge that can be hazardous. This article presents electrocoagulation and electroflotation as an electricity-based alternative. These techniques use electric current between metallic plates to generate the agents needed to remove contaminants. Ions form that gather small particles and gas bubbles that make contaminants float to the surface. Benefits include reduction of chemical use, less sludge generation, and adaptability to different contaminants. These technologies have potential to be combined with renewable energy and applied in communities with less infrastructure.

¿Por qué es importante este tema?

Millones de litros de agua sucia se producen diariamente en casas, fábricas y hospitales. Esta agua contiene partículas pequeñas, aceites, grasas, metales y otros contaminantes que requieren

Afiliaciones:

¹Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México. Paseo Universidad S/N, Toluca, Estado de México. CP. 50000. México. Correo: proyectos@javiersalasg.com; oportillor@uaemex.mx; rmartinezme@uaemex.mx

* Autor de correspondencia: proyectos@javiersalasg.com



tratamiento especializado. Los métodos tradicionales añaden sustancias químicas que funcionan como pegamento para unir partículas pequeñas en grupos grandes que se pueden separar.

La pregunta natural es: ¿hay forma de limpiar el agua sin depender tanto de químicos externos? La respuesta está en usar electricidad para generar los agentes necesarios directamente en el lugar de tratamiento. La Figura 1 muestra la diferencia entre métodos tradicionales y electroflotación. En tratamientos convencionales se agregan químicos que aumentan costos y generan lodos peligrosos. La electroflotación usa electrodos que pasan corriente para formar burbujas que pegan partículas contaminantes y las hacen subir hacia la superficie.

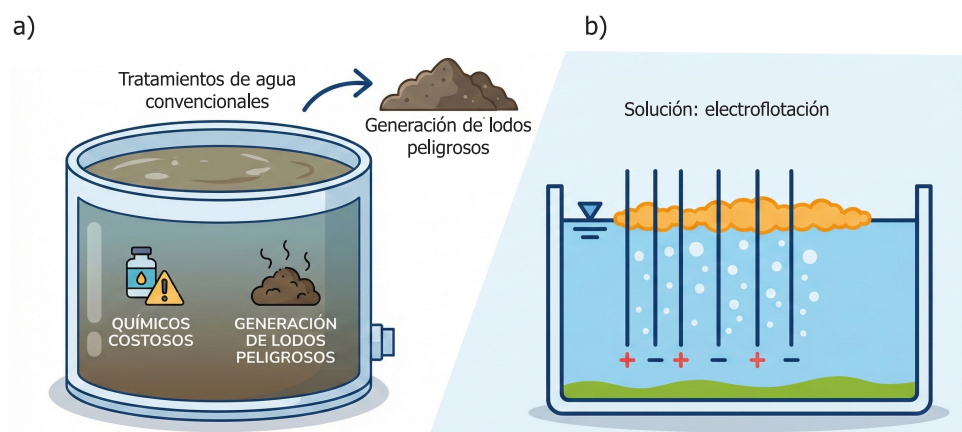


Figura 1: Comparación entre tratamientos convencionales con adición de químicos (a) y electroflotación con generación de burbujas mediante electrodos (b).

¿Qué sabíamos antes?

El tratamiento de agua usando coagulación tiene más de cien años de historia. Los primeros sistemas usaban sales de metal como sulfato de aluminio. Cuando se disuelven en agua, liberan iones positivos que neutralizan las cargas negativas de partículas sucias, permitiendo que se junten en flóculos. Durante el siglo veinte se crearon polímeros sintéticos más eficientes, pero el principio no cambió: agregar químicos al agua. Las limitaciones se hicieron claras cuando creció la escala de tratamiento. El costo de químicos representa parte importante del costo total, y la generación de lodos con mucho contenido químico se volvió problemática.

El cambio llegó cuando se observó que pasar corriente eléctrica entre electrodos de metal sumergidos generaba efectos parecidos a la adición de coagulantes químicos. Los estudios modernos se han enfocado en mejorar parámetros como densidad de corriente, tiempo de tratamiento y material de electrodos para aumentar la remoción de contaminantes [1].

¿Cómo funciona la nueva propuesta?

La electrocoagulación genera iones coagulantes por disolución electroquímica de electrodos metálicos. ¿Y eso qué significa? Significa que, al pasar corriente eléctrica por las placas de metal

que están dentro del agua, una de esas placas libera pequeñas “partes” del metal en forma de iones (son partículas diminutas con carga eléctrica). Esos iones funcionan como un ayudante que hace que la suciedad deje de estar dispersa: se pegan a las partículas contaminantes y ayudan a que se junten en grumos más grandes. Cuando la suciedad está en grumos, es mucho más fácil separarla del agua, ya sea porque flota con burbujas o porque se puede retirar como lodo.

En la práctica, ambos procesos ocurren simultáneamente en un reactor cuando se pasa corriente entre electrodos sumergidos.

La Figura 2 muestra un montaje experimental. El sistema usa placas de metal paralelas dentro del agua. Las placas externas se conectan a la fuente de corriente: una como ánodo (polo positivo) y otra como cátodo (polo negativo). Las placas que están en medio también reciben el efecto de la corriente porque el agua deja pasar electricidad. Por eso, aunque no estén conectadas con cables, una cara de la placa se comporta como positivo y la otra como negativo, y así funcionan como electrodos “por ambos lados”. Las conexiones eléctricas se hacen únicamente en los extremos, mientras que placas intermedias trabajan como electrodos bipolares. Se observa formación de capa flotante con contaminantes en la superficie y sedimento en el fondo.

Si cada placa tiene su propio cable (o queda conectada con puentes), entonces la polaridad es simple: toda la placa queda positiva (ánodo) o toda la placa queda negativa (cátodo). Por eso se dice que las placas están con polaridad “fija”, definida por el cableado. En ese caso, es normal ver una placa “toda +” y la de al lado “toda –”, alternadas.

Pero si, como en la Figura 2, solo se conectan las placas de los extremos y las placas de en medio no llevan cable, entonces esas placas intermedias no quedan “todas +” o “todas –”. Aunque no estén conectadas, sí sienten el voltaje porque el agua conduce electricidad. Entonces ocurre lo siguiente: en una placa intermedia, la cara que queda mirando hacia el lado negativo se comporta como positiva, y la cara que queda mirando hacia el lado positivo se comporta como negativa. Es decir, una misma placa trabaja con dos comportamientos a la vez, uno en cada cara.

A eso se le llama electrodo bipolar: no se habla de una placa completamente positiva o negativa, sino de polaridad por cara. En cambio, en la Figura 2, las placas conectadas directamente a la fuente (las señaladas como (d) y (e)) sí tienen polaridad definida por el cable: una queda como ánodo y la otra como cátodo.

Ahora presta atención a la Figura 2 (f), ahí se puede ver parde del contaminante en el fondo. ¿Cómo llegó ahí si al principio del experimento todos los contaminantes estaban flotando?. Bueno, en primer lugar, no todos los contaminantes flotan si se deja sin agitar el agua un tiempo, es decir, se sedimentan, pero hay otros que solo hasta que se les aplica electricidad se acumulan en el fondo como se muestra en la Figura 3. El agua clarificada queda en la zona media del reactor, entre la capa flotante superficial y el sedimento del fondo. Comparado con métodos convencionales, la electrocoagulación ofrece varias ventajas: no necesita almacenamiento de químicos peligrosos, genera menos lodo, los lodos son más compactos, el sistema es compacto y puede operarse automáticamente. Además es versátil y se adapta a diferentes contaminantes ajustando el voltaje que se aplica, el tiempo que se aplica la electricidad, la distancia entre las placas, etcétera [2].

Para entender lo que ocurre en la Figura 3, conviene revisar qué reacciones se activan cuando

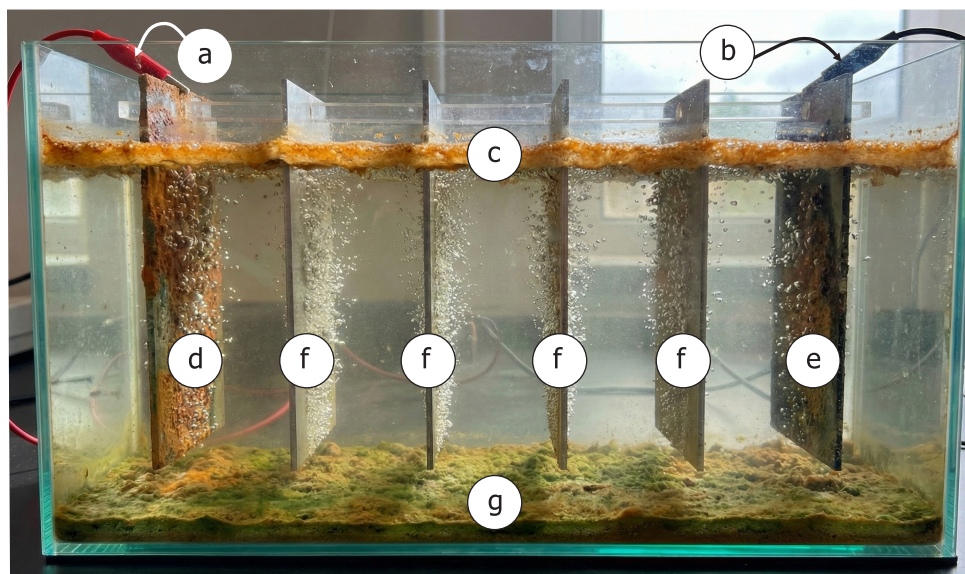


Figura 2: Montaje experimental mostrando conexiones eléctricas en los extremos (a,b), capa flotante de contaminantes (c), electrodos monopolares (d,e), electrodos bipolares (f) y sedimento en el fondo (g).

se hace pasar corriente entre las placas. En forma simple, una placa es el sitio donde el metal se “desprende” hacia el agua y la otra es el sitio donde el agua produce burbujas. Con eso se explica por qué, al mismo tiempo, se generan especies que ayudan a juntar la suciedad y también burbujas que ayudan a separarla por flotación.

En el ánodo (la placa que va perdiendo metal), el aluminio del electrodo pasa al agua como iones de aluminio. Este paso puede escribirse como:



Esta ecuación indica que el aluminio sólido se transforma en Al^{3+} y libera electrones (e^{-}) al circuito. Lo importante es que esos iones Al^{3+} son el origen del coagulante que se forma dentro del mismo reactor, y por eso facilitan que partículas muy finas de contaminante dejen de estar dispersas y empiecen a juntarse.

En el cátodo (la placa opuesta), el agua recibe electrones y se forman gas hidrógeno e iones hidroxilo. La reacción típica es:



Aquí, H_2 aparece en forma de burbujas, que pueden adherirse a los grumos (flóculos) y ayudarles a subir. Al mismo tiempo, los OH^{-} hacen que la zona cercana al cátodo se vuelva más básica, lo que favorece que el aluminio liberado no permanezca como ion por mucho tiempo.

Por eso, dentro del agua, los iones de aluminio reaccionan con los iones hidroxilo y forman hidróxido de aluminio:



El $\text{Al}(\text{OH})_3$ puede entenderse como un material gelatinoso muy fino que se forma en el líquido. Ese material ayuda a atrapar partículas suspendidas y gotas de aceite, de modo que se formen flóculos más grandes. Una vez que existen esos flóculos, las burbujas de H_2 producidas en el cátodo pueden pegarse a ellos, disminuir su densidad aparente y favorecer su ascenso, lo que se refleja en la acumulación de espuma superficial observada al final de la secuencia en la Figura 3.

Con eso se entiende lo que muestra la Figura 3. La figura se lee de izquierda a derecha, como si fuera una secuencia de lo que va pasando con el agua al encender el equipo. Al inicio ($t=0$), la suciedad está en partículas muy pequeñas y también hay gotitas de aceite. Como son tan finas, no se van al fondo rápido ni flotan por sí solas; se quedan repartidas en el agua y por eso el líquido se ve turbio. Cuando se aplica electricidad ($t=1$), en el agua aparecen iones positivos que ayudan a cambiar ese comportamiento. Esos iones se acercan a las partículas y hacen que ya no se mantengan separadas, de modo que empiezan a pegarse unas con otras. En ese momento todavía son pequeñas, pero ya se está formando el primer agrupamiento. Después ($t=2$), esos grupos crecen y se vuelven flóculos, que son como grumos visibles o casi visibles. Al mismo tiempo, se forman burbujas de gas en las placas. Muchas burbujas se pegan a los flóculos y les dan “empuje” hacia arriba, como si les pusieran pequeños flotadores. Finalmente ($t=3$), con más burbujas pegadas, los flóculos suben y se acumulan en la superficie formando una capa de espuma. Esa espuma concentra buena parte de lo que se quiere quitar, por lo que puede retirarse con una espátula, una malla o un sistema de desnatao, y el agua que queda en medio se observa más clara.

Casos prácticos y aplicaciones

La electrocoagulación se ha aplicado exitosamente en diversos sectores. En la industria de alimentos trata aguas con grasas, aceites y materia orgánica. Los mataderos generan aguas con sangre, grasas y proteínas que se pueden quitar eficientemente [3]. En la industria textil, las aguas residuales contienen colorantes difíciles de remover. La electrocoagulación muestra capacidad para quitar colorantes con eficiencias superiores al noventa por ciento en treinta a sesenta minutos [4]. La industria de galvanoplastia genera aguas con metales pesados como cromo, níquel y cobre. La electrocoagulación precipita estos metales como hidróxidos insolubles. El lodo concentrado puede tener valor de recuperación [5]. Los beneficios reportados incluyen remociones de turbidez superiores al noventa y cinco por ciento, reducción de demanda química de oxígeno entre sesenta y noventa por ciento. Los consumos de energía varían entre uno y diez kilovatios-hora por metro cúbico, competitivos con costos de químicos en plantas convencionales [6], [7], [8].

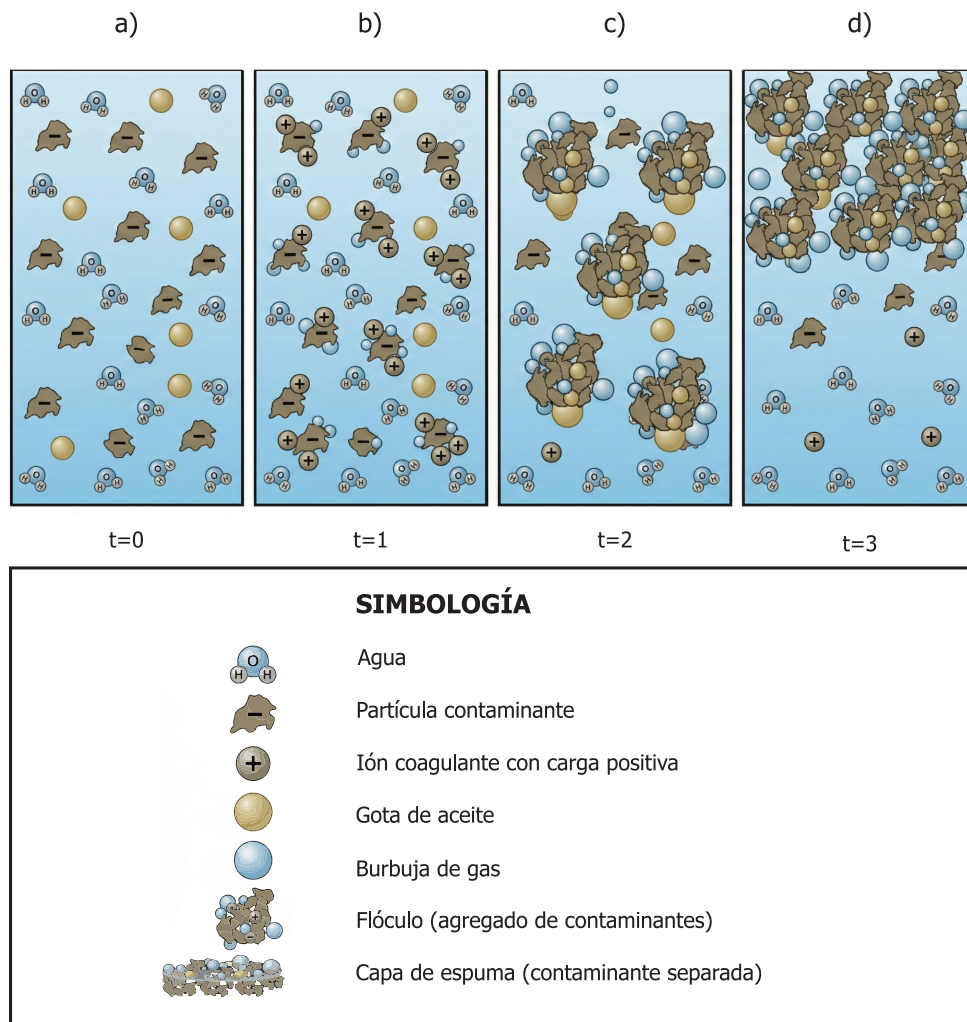


Figura 3: Secuencia temporal del mecanismo de electrocoagulación y electroflotación: en (a) $t=0$ se observa la dispersión inicial de partículas contaminantes y gotas de aceite en el agua; en (b) $t=1$ aparecen los iones coagulantes positivos que favorecen que las partículas se junten; en (c) $t=2$ se forman flóculos (grumos) y se adhieren burbujas de gas a estos agregados; y en (d) $t=3$ los flóculos con burbujas ascienden y se acumulan en la superficie como una capa separable.

¿Qué significa esto para ti?

El desarrollo de estas tecnologías tiene impactos más allá de lo que se puede hacer en la industria. El acceso a agua limpia es indispensable para la salud. Estas tecnologías permiten que comunidades pequeñas traten su propia agua sin infraestructura compleja. Un sistema puede operarse con energía solar en zonas rurales. La reducción de químicos disminuye la exposición de operadores a sustancias peligrosas. Los sistemas electroquímicos eliminan riesgos de inhalación, contacto con piel y derrames, creando ambientes más seguros.

Desde el punto de vista social, la descentralización del tratamiento es posible con sistemas modulares en escuelas, hospitales o comunidades pequeñas. Las oportunidades profesionales crecen en áreas que combinan electroquímica, ingeniería de procesos y ciencias ambientales.

Sin embargo, hay consideraciones importantes. El consumo eléctrico es un factor económico. En zonas donde la electricidad es cara o no renovable, el balance ambiental puede no ser favorable. El mantenimiento de electrodos que se consumen periódicamente afecta la economía del proceso. Los lodos generados necesitan caracterización y disposición adecuadas.

El futuro que nos espera

La investigación actual se enfoca en varios frentes. Se desarrollan nuevos materiales para electrodos, como titanio cubierto con óxidos metálicos que tienen mayor durabilidad [9].

Otra línea busca reducir consumo de energía usando corriente pulsada en lugar de continua. Los resultados sugieren ahorros de energía entre veinte y cuarenta por ciento [10].

A corto plazo se espera comercialización de sistemas compactos modulares con paneles solares, baterías y reactores integrados para comunidades pequeñas. A largo plazo, la integración con otras tecnologías permitiría degradar contaminantes orgánicos persistentes y producir agua potable directamente.

La convergencia con tecnologías de información abre posibilidades interesantes. Sensores pueden alimentar algoritmos de control que ajusten automáticamente la corriente aplicada. Un área emergente es la recuperación de recursos valiosos de los contaminantes.

Los obstáculos incluyen estandarización de diseño y mayor evidencia de desempeño a largo plazo. El escalamiento industrial presenta desafíos técnicos en distribución de corriente y manejo de grandes volúmenes, pero los avances sugieren que se pueden superar.

Referencias

- [1] S. Boinpally, A. Kolla, J. Kainthola, R. Kodali y J. Vemuri, “A state-of-the-art review of the electrocoagulation technology for wastewater treatment”, *Water Cycle*, vol. 4, págs. 26-36, 2023. DOI: [10.1016/j.watcyc.2023.01.001](https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2023.01.001)

-
- [2] D. T. Moussa, M. H. El-Naas, M. Nasser y M. J. Al-Marri, “A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges”, *Journal of Environmental Management*, vol. 186, págs. 24-41, 2017. DOI: [10.1016/j.jenvman.2016.10.032](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.032)
- [3] M. Asselin, P. Drogui, H. Benmoussa y J.-F. Blais, “Effectiveness of electrocoagulation process in removing organic compounds from slaughterhouse wastewater using monopolar and bipolar electrolytic cells”, *Chemosphere*, vol. 72, n.º 11, págs. 1727-1733, 2008. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2008.04.067](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.04.067)
- [4] B. K. Korbahti, K. Artut, C. Gecgel y A. Ozer, “Electrochemical decolorization of textile dyes and removal of metal ions from textile dye and metal ion binary mixtures”, *Chemical Engineering Journal*, vol. 173, n.º 3, págs. 677-688, 2011. DOI: [10.1016/j.cej.2011.02.018](https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.02.018)
- [5] F. Akbal y S. Camci, “Copper, chromium and nickel removal from metal plating wastewater by electrocoagulation”, *Desalination*, vol. 269, n.º 1-3, págs. 214-222, 2011. DOI: [10.1016/j.desal.2010.11.001](https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.11.001)
- [6] S. Garcia-Segura, M. M. S. G. Eiband, J. V. de Melo y C. A. Martinez-Huitle, “Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies”, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 801, págs. 267-299, 2017. DOI: [10.1016/j.jelechem.2017.07.047](https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.07.047)
- [7] V. Kuokkanen, T. Kuokkanen, J. Romo y U. Lassi, “Recent applications of electrocoagulation in treatment of water and wastewater—a review”, *Green and Sustainable Chemistry*, vol. 3, n.º 2, págs. 89-121, 2013. DOI: [10.4236/gsc.2013.32013](https://doi.org/10.4236/gsc.2013.32013)
- [8] M. M. Emamjomeh y M. Sivakumar, “Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes”, *Journal of Environmental Management*, vol. 90, n.º 5, págs. 1663-1679, 2009. DOI: [10.1016/j.jenvman.2008.12.011](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.12.011)
- [9] X. Chen, G. Chen y P. L. Yue, “Investigation on the electrolysis voltage of electrocoagulation”, *Chemical Engineering Science*, vol. 57, n.º 13, págs. 2449-2455, 2002. DOI: [10.1016/S0009-2509\(02\)00147-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(02)00147-1)
- [10] S. Vasudevan, L. Jothinathan y G. Sozhan, “Studies on the removal of iron from drinking water by electrocoagulation—A clean process”, *Clean - Soil, Air, Water*, vol. 37, n.º 1, págs. 45-51, 2009. DOI: [10.1002/clen.200800175](https://doi.org/10.1002/clen.200800175)

Bases físicas de cómo fabricar órganos de gelatina con bioimpresión 3D

Physical principles behind fabricating gelatin organs with 3D bioprinting

Valenzuela-Reyes, M. B.^{1*} , Martínez-Pérez, C. A.¹ , Zúñiga-Aguilar, E. S.¹ 

Historial del artículo

Recibido: 22-mar-2025

Aceptado: 02-may-2025

Disponible en línea: 30-ago-2025

Palabras clave

ES: Ingeniería Tisular, Órganos sintéticos, Bioimpresión 3D, Simulación

EN: Tissue Engineering, Synthetic Organs, 3D bioprinting, Simulation

RESUMEN

La falta de órganos para trasplante es uno de los grandes retos de la medicina moderna. Una de las rutas que se explora en laboratorios de todo el mundo es la bioimpresión 3D: fabricar andamios de materiales blandos que imiten la estructura natural de los tejidos parecidos a la gelatina, y que llamamos biotintas sobre los que más adelante se puedan sembrar y crecer células en condiciones artificiales. Para que esa idea funcione no basta con tener una impresora bonita; es necesario comprender cómo se comporta el material cuando se deforma y fluye. Esa rama de la física se llama reología y permite responder preguntas como: ¿la biotinta saldrá por la boquilla sin romperse?, ¿conservará la forma del “órgano” una vez impresa?, ¿se deformará demasiado durante la incubación a 37 °C? En este trabajo se explica, con ejemplos sencillos, cómo se usan mediciones reológicas, simulaciones por computadora (CFD y modelos de deformación) y una bioimpresora 3D comercial para imprimir andamios de gelatina con forma de órgano. Finalmente, se muestran de forma cualitativa las pruebas de incubación que permiten observar cómo estos constructos ganan agua, pierden masa y cambian de pH con el tiempo, preparando el camino hacia futuras aplicaciones en medicina regenerativa.

ABSTRACT

The lack of organs for transplantation is one of the great challenges of modern medicine. One of the paths being explored in laboratories around the world is 3D bioprinting: fabricating scaffolds from soft materials that mimic the natural structure of tissues, similar to gelatin, which we call bioinks, and on which cells can later be seeded and grown under artificial conditions. For this idea to work, having a fancy printer is not enough; it is essential to understand how the material behaves when it deforms and flows. That branch of physics is called rheology, and it helps answer questions such as: Will the bioink come out of the nozzle without breaking? Will it preserve the “organ” shape once printed? Will it deform too much during incubation at 37 °C? In this work, using simple examples, we explain how rheological measurements, computer simulations (CFD and deformation models), and a commercial 3D bioprinter are used to print gelatin scaffolds with organ-like shapes. Finally, we qualitatively present incubation tests that allow us to observe how these constructs absorb water, lose mass, and change pH over time, paving the way for future applications in regenerative medicine.

Afiliaciones:

¹ Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Correo: marcos.valenzuela@uacj.mx; camartin@uacj.mx; esmeralda.zuniga@uacj.mx

* Autor de correspondencia: marcos.valenzuela@uacj.mx



¿Por qué es importante este tema?

Cada día, miles de pacientes en el mundo esperan un trasplante de órgano que tal vez nunca llegue. Aun cuando existe un donador compatible, el órgano debe mantenerse en buenas condiciones, transportarse rápido y resistir el procedimiento quirúrgico. Por eso, desde hace años se investiga una idea muy atractiva: fabricar órganos a la carta usando materiales blandos y células del propio paciente, reduciendo el riesgo de rechazo [1].

En esta visión, el órgano no se “esculpe” a mano, sino que se imprime capa por capa con ayuda de una bioimpresora 3D. El material base suele ser un hidrogel: una red de polímero que contiene muchísima agua, como una gelatina muy suave. Si ese andamio tiene la forma adecuada y los poros correctos, puede servir como casa temporal para células que, con el tiempo, reconstruyan tejido funcional [1].

Imprimir materiales blandos es mucho más difícil de lo que parece. Si la biotinta es demasiado líquida, se escurre; si es demasiado rígida, ni siquiera sale de la boquilla. Aquí entra en juego la reología, la ciencia que estudia como fluyen y se deforman los materiales, y que se vuelve el puente entre la receta del material y el “órgano” impreso [1].

¿Qué sabíamos antes?

Evolución histórica la fabricación de andamios para ingeniería de tejidos comenzó mucho antes de que existieran las impresoras 3D. Tradicionalmente se usaban espumas poliméricas, moldes y técnicas como el electrohilado para crear fibras delgadas. Estos métodos funcionan, pero tienen limitaciones: es difícil controlar con precisión la forma final y la distribución de poros [1].

Cuando llegaron las impresoras 3D comerciales, se abrió la posibilidad de controlar la geometría digitalmente: se diseña un modelo en computadora y usando un código máquina la impresora lo reproduce depositando el material capa por capas. Al principio se trabajó sobre todo con plásticos rígidos (PLA, ABS), ideales para piezas estructurales, pero poco aptos para alojar células [1].

La gelatina muy conocida en la cocina y en la industria farmacéutica comenzó a utilizarse como base de hidrogeles o biotintas compatibles que combinadas con otros polímeros, como el polietilenglicol (PEG) o con grupos siloxano, se pueden ajustar la rigidez, la velocidad de degradación y la capacidad de retener agua. Estos materiales mixtos permiten obtener biotintas que se parecen más a los tejidos blandos del cuerpo humano [1].

¿Qué es una biotinta de gelatina?

Principio básico fundamental Una biotinta es un material diseñado para ser extruido a través de una boquilla y depositada capa por capa, manteniendo forma suficiente para construir estructuras tridimensionales. En este caso se trabaja con hidrogeles cuya base es gelatina, un polímero derivado del colágeno [2].

Para mejorar sus propiedades se puede combinar con PEG, que ayuda a controlar la cantidad de agua y la velocidad con la que el material se hincha o se degrada. Segmentos de siloxano, que aportan mayor estabilidad térmica y mecánica [2].

En el laboratorio, estas mezclas se preparan calentando agua y polímeros hasta que se disuelven y después se dejan enfriar para formar una red gelatinosa. Cambiando las concentraciones, el tiempo de agitación y la temperatura, se obtiene toda una “familia” de biotintas, desde las que se comportan casi como miel espesa hasta las que recuerdan más a una gomita elástica [2].

La clave es seleccionar aquella formulación que, al mismo tiempo; pueda fluir dentro de la boquilla y sostenerse una vez impresa. Esa ventana de impresión solo se descubre midiendo su comportamiento de forma sistemática [2].

¿Qué papel juega la reología?

La reología estudia el comportamiento de los materiales cuando se les aplica una fuerza. En un hidrogel de gelatina, esa respuesta mezcla dos comportamientos: elástico, como un resorte si lo estiramos regresa (hasta cierto punto) a su forma original. Viscoso, como la miel: fluye lentamente cuando se le aplica esfuerzo. Para medir estas propiedades se usa un aparato llamado reómetro. Funciona, en términos sencillos, como dos platos paralelos: la muestra se coloca entre ellos y uno de los platos gira o se deforma muy ligeramente mientras se mide la resistencia que ofrece el material. Con esto se obtienen curvas de viscosidad frente a velocidad de deformación, y parámetros como el módulo de almacenamiento (qué tanta energía elástica guarda el material) y el módulo de pérdida (qué tanto se comporta como un líquido) [3].

Cuando estas mediciones se hacen a diferentes temperaturas y frecuencias, se puede construir un “mapa de comportamiento” de la biotinta. A bajas velocidades de corte se quiere que la viscosidad sea relativamente alta, para que el “órgano” no colapse. A altas velocidades de corte (como las que hay dentro de la boquilla) interesa que la viscosidad baje, de modo que el material fluya sin exigir presiones excesivas [3].

Este fenómeno, llamado **adelgazamiento por esfuerzo**, es muy útil en bioimpresión: el material se vuelve más fluido solo cuando se le está empujando con fuerza, y recupera parte de su rigidez justo después de salir, ayudando a que las capas mantengan su forma [3].

De la reología a los parámetros de bioimpresión

Las curvas reológicas no son solo gráficas bonitas. A partir de ellas se pueden **estimar directamente los parámetros de impresión**. El procedimiento típico comienza por definir las dimensiones de la boquilla (diámetro y longitud), para después consultar la viscosidad de la biotinta en el rango de velocidades asociado. Posteriormente, se utilizan ecuaciones de flujo interno para estimar la caída de presión requerida y finalmente se traduce esa presión en los parámetros disponibles en la bioimpresora, como los kilopascales en un sistema neumático [4], [5].

En el laboratorio, esos cálculos se convierten en una **ventana de operación**: un rango de presiones y velocidades de cabezal donde se obtiene un filamento continuo sin goteo ni cortes.

Fuera de esa ventana, aparecen defectos: líneas interrumpidas, paredes abultadas o colapso total de la pieza. De este modo, la reología reduce el ensayo y error y hace que cada prueba de impresión tenga más posibilidades de éxito como se observa en la Figura 1 [4], [5].

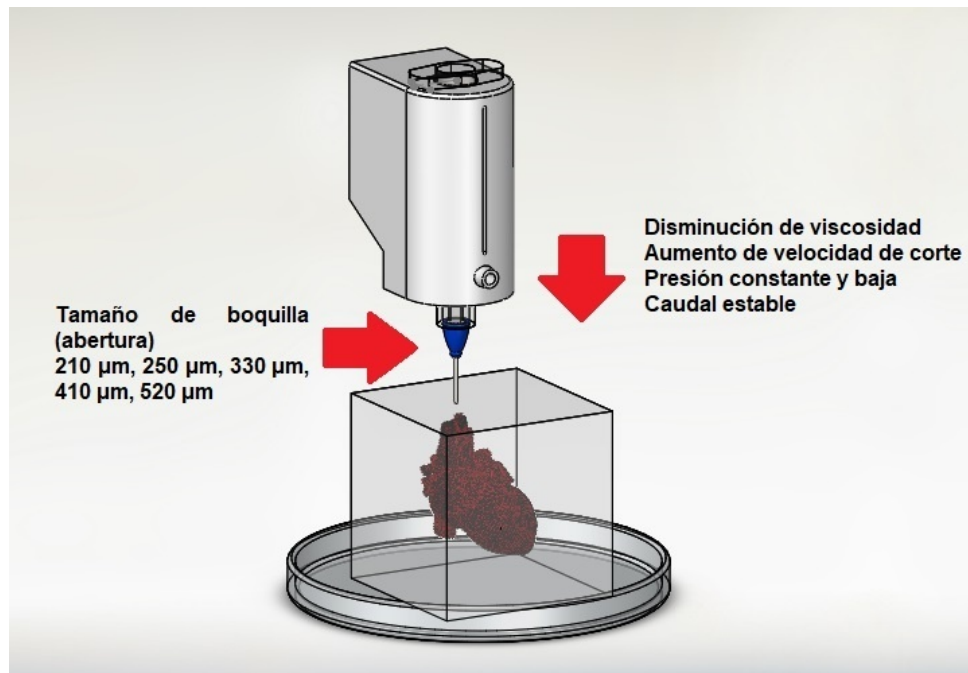


Figura 1: Esquema de bioimpresión por extrusión: una presión baja y constante hace que la biotinta fluya por boquillas de distinto diámetro (210–520 μm), reduzca su viscosidad y salga con un caudal estable.

La bioimpresora 3D: una “cafetera” muy precisa

Para materializar el diseño se usa una bioimpresora de extrusión, como la **BIO X**, pensada para trabajar en ambientes de laboratorio. Esta plataforma permite: usar diferentes modos de extrusión: neumático, émbolo, térmico o fotocurado, mantener un ambiente estéril gracias a flujo laminar con filtros HEPA y luz UV-C, controlar la temperatura de cama y cabezales, lo que es crucial para hidrogeles que cambian de consistencia con pocos grados y ajustar con precisión presión, velocidad y trayectoria del cabezal [6].

En términos simples, es como una impresora 3D de plástico, pero adaptada para materiales blandos y, eventualmente, para trabajar con células vivas. La biotinta de gelatina se carga en cartuchos y, tras un tiempo de estabilización de temperatura, se imprime siguiendo un modelo CAD del “órgano” o del andamio deseado [6].

Simulación por computadora: ver el interior de la boquilla

Aun con buenas mediciones reológicas, resulta difícil observar lo que pasa dentro de la boquilla durante la extrusión. Para eso se utiliza la **Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)**, que permite resolver en la computadora cómo se distribuyen velocidad, presión y esfuerzo cortante dentro de canales muy pequeños [5], [7].

Con un modelo CFD se pueden probar distintos escenarios sin gastar material: cambiar el diámetro o la longitud de la boquilla, Modificar la velocidad de impresión y evaluar regiones donde el esfuerzo cortante podría ser tan alto que dañe células (en futuras aplicaciones bio). Los resultados suelen mostrarse como mapas de colores: zonas azules con baja velocidad, zonas rojas con alta velocidad o alto esfuerzo. A partir de ellos se ajustan dimensiones y parámetros para lograr un flujo más uniforme y evitar puntos de obstrucción. De manera análoga, se pueden hacer simulaciones de deformación del constructo completo durante la incubación, acoplando transferencia de calor, difusión de agua e hinchamiento del hidrogel. Esto permite estimar dónde se concentran las mayores deformaciones y comprobar que la estructura se mantiene dentro de un rango seguro [5], [7].

Casos prácticos y aplicaciones

Con todas estas herramientas, se puede proponer una estrategia para imprimir un **andamio complejo con forma de órgano** (por ejemplo, una pequeña vértebra o un corazón). Esta estrategia comprende varias etapas clave. Primero, el diseño digital permite crear un modelo 3D en software especializado para definir cavidades internas y porosidad global. A esto le sigue la preparación de la biotinta, seleccionando una formulación de gelatina modificada con PEG y siloxano que posea propiedades reológicas adecuadas para ser cargada en el cartucho. Mediante la simulación y el ajuste de parámetros, basados en mediciones reológicas y modelos de CFD, se fijan la presión, velocidad y temperatura de trabajo para asegurar un filamento continuo. Durante la impresión embebida, el constructo se deposita dentro de una matriz sacrificial de gelatina-PEG que sirve como soporte temporal. Finalmente, se aplica un proceso de entrecruzamiento, ya sea químico o térmico, para estabilizar la red del hidrogel, seguido de una liofilización que genera una red de poros interconectados para mejorar la absorción de líquidos y difusión de nutrientes. Todo este flujo de trabajo suele tomar varias horas [8], [9].

El resultado es un “órgano de gelatina”: un andamio con forma compleja, estable a temperatura ambiente e inicialmente seco, listo para ser rehidratado, esterilizado y, en un contexto futuro, sembrado con células como se observa en la Figura 2 [8], [9].

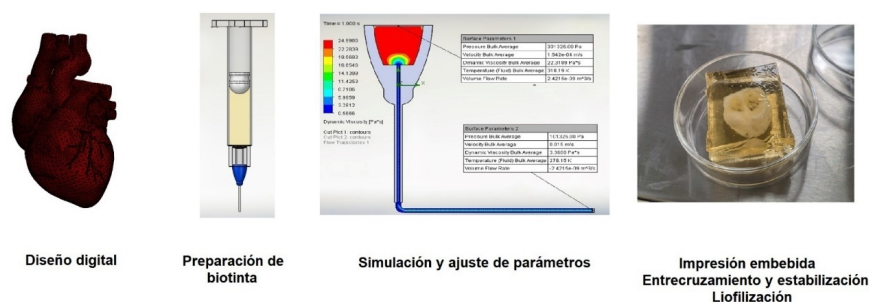


Figura 2: Flujo de trabajo para fabricar un órgano de gelatina: diseño digital, preparación de la biotinta, simulación de extrusión e impresión embebida en matriz de soporte con liofilización final.

Pruebas de incubación: ¿La pieza sobrevive al ambiente del cuerpo?

El siguiente reto es comprobar si el andamio mantiene forma y propiedades cuando se expone a un entorno similar al del cuerpo humano. Para ello se diseñan pruebas de incubación donde los constructos se sumergen en un medio líquido a 37 °C y se siguen durante varios días [10].

Un esquema típico incluye mediciones en los días 1, 3, 12 y 21, observando: hinchamiento (cuánto aumenta el volumen al absorber agua), pérdida de masa (qué porcentaje del material se ha disuelto o degradado) y cambio de pH (cómo se modifica la acidez del medio, lo cual da pistas sobre los productos de degradación).

Las observaciones cualitativas revelan que en el día 1 la pieza se mantiene casi idéntica al inicio con solo hidratación superficial. Para el día 3, el volumen aumenta y los bordes comienzan a ablandarse, mientras que en el día 12 el medio cambia de color por la difusión de componentes y los poros se abren más. Finalmente, en el día 21, la matriz se vuelve más transparente o amarillenta, con poros claramente conectados y una ligera pérdida de volumen [10].

En conjunto, estos resultados indican que el andamio mantiene su forma global mientras avanza una degradación controlada. Esto es deseable: se quiere que el material soporte el tiempo suficiente para que las células colonicen la estructura, pero que eventualmente se degrade dejando solo tejido biológico [10].

¿Qué significa esto para ti?

Si eres estudiante de preparatoria o de primeros semestres de universidad, quizá te preguntes dónde encajas en todo esto. La bioimpresión 3D de órganos de gelatina es un ejemplo claro de **trabajo interdisciplinario**: necesita **física y matemáticas** para entender la reología y las simulaciones, requiere **química y ciencia de materiales** para formular hidrogeles estables y biocompatibles, depende de **biología y medicina** para definir qué propiedades deben tener los andamios para ser útiles en regeneración tisular. Este tipo de proyectos muestra que la ingeniería moderna ya no se limita a construir máquinas; también diseña materiales, algoritmos y procesos para resolver problemas de salud y calidad de vida [1].

El futuro que nos espera

Investigación y desarrollos actuales A corto plazo, los avances en reología, simulación y control inteligente de impresión permitirán fabricar andamios personalizados que imiten mejor la forma interna de órganos específicos, usando imágenes médicas (como tomografías) como punto de partida [1].

A mediano plazo, la integración con células vivas será el siguiente gran paso: imprimir no solo el andamio de gelatina, sino también capas de células en posiciones precisas, manteniendo su viabilidad durante el proceso. Para lograrlo se necesitarán biotintas aún más sofisticadas, así como impresoras capaces de controlar con mayor precisión temperatura, oxígeno y nutrientes [1].

A largo plazo, la combinación de modelos computacionales avanzados (que predigan cómo crecerá el tejido y cómo se degradará el material). Queda mucho trabajo por delante, pero los órganos de gelatina impresos hoy en día son un recordatorio tangible de que la bioimpresión 3D ya no es solo ciencia ficción: es un campo real donde la física de materiales, la computación y la medicina se unen para construir posibles soluciones al problema de la falta de órganos [1].

Referencias

- [1] J. Halper, “Narrative review and Guide: state of the art and emerging opportunities of bioprinting in tissue regeneration and medical instrumentation”, *Bioengineering*, vol. 12, n.º 1, pág. 71, 2025. DOI: [10.3390/bioengineering12010071](https://doi.org/10.3390/bioengineering12010071)
- [2] J. Yang, H. He, D. Li et al., “Advanced strategies in the application of gelatin-based bioink for extrusion bioprinting”, *Bio-Design and Manufacturing*, vol. 6, págs. 586-608, 2023. DOI: [10.1007/s42242-023-00236-4](https://doi.org/10.1007/s42242-023-00236-4)
- [3] R. Sánchez-Sánchez, J. M. Rodríguez-Rego, A. Macías-García et al., “Relationship between shear-thinning rheological properties of bioinks and bioprinting parameters”, *International Journal of Bioprinting*, vol. 9, pág. 687, 2023. DOI: [10.18063/ijb.687](https://doi.org/10.18063/ijb.687)
- [4] G. J. Gillispie, J. Copus, M. Uzun-Per et al., “The correlation between rheological properties and extrusion-based printability in bioink artifact quantification”, *Materials & Design*, vol. 233, pág. 112237, 2023. DOI: [10.1016/j.matdes.2023.112237](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112237)
- [5] M. B. Valenzuela-Reyes, E. S. Zuñiga-Aguilar, C. Chapa-González et al., “Enhancing 3D printing of gelatin/siloxane-based cellular scaffolds using a computational model”, *Polymers*, vol. 17, n.º 13, pág. 1838, 2025. DOI: [10.3390/polym17131838](https://doi.org/10.3390/polym17131838)
- [6] CELLINK. “BIO X 3D bioprinter”. Accessed: 2026-01-21. dirección: <https://www.cellink.com/bioprinting/bio-x-3d-bioprinter/>
- [7] R. Gharraei, D. J. Bergstrom y X. Chen, “Extrusion bioprinting from a fluid mechanics perspective”, *International Journal of Bioprinting*, vol. 0, pág. 3973, 2024. DOI: [10.36922/ijb.3973](https://doi.org/10.36922/ijb.3973)
- [8] S. Bautista Reberte, E. Zuñiga Aguilar, S. I. Rivera Manrique y C. A. Martínez-Pérez, “Manufacture of a chitosan-based bioink with gelatin and hydroxyapatite and its potential application in 3D bioprinting”, *Express Polymer Letters*, vol. 19, págs. 326-338, 2025. DOI: [10.3144/expresspolymlett.2025.23](https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2025.23)
- [9] T. Hu, Z. Cai, R. Yin et al., “3D embedded printing of complex biological structures with supporting bath of pluronic F-127”, *Polymers*, vol. 15, n.º 17, pág. 3493, 2023. DOI: [10.3390/polym15173493](https://doi.org/10.3390/polym15173493)
- [10] S. Masri, M. Maarof, I. A. Aziz et al., “Performance of hybrid gelatin-PVA bioinks integrated with genipin through extrusion based 3D bioprinting: an in vitro evaluation using human dermal fibroblasts”, *International Journal of Bioprinting*, vol. 9, pág. 677, 2023. DOI: [10.18063/ijb.677](https://doi.org/10.18063/ijb.677)

Divulgación creativa y amigable: Educación ambiental y emprendimiento

Creative and friendly outreach: Environmental education and entrepreneurship

González-Palomares, S.^{1*} 

Historial del artículo

Recibido: 15-mar-2025

Aceptado: 02-may-2025

Disponible en línea: 30-ago-2025

Palabras clave

ES: Educación ambiental, emprendimiento, divulgación

EN: Environmental education, entrepreneurship, dissemination

RESUMEN

Este proyecto es una estrategia que surgió para atender necesidades de la sociedad de Jalisco, incluyendo fomentar las vocaciones científicas, la educación ambiental y el emprendimiento en la población. Aunque también se han realizado algunas participaciones en otros estados de la República Mexicana. Como principales hallazgos se logró fomentar las vocaciones científicas mediante eventos de divulgación de la ciencia que incluyeron conferencias y talleres, impulsando el interés por la ciencia y la tecnología, el emprendimiento y los cuidados del medio ambiente. Este proyecto significa contribuir en un futuro en el impulso de las siguientes generaciones de profesionistas, teniendo mayor impacto en los proyectos de medio ambiente y emprendimiento, promoviendo el bienestar en la sociedad.

ABSTRACT

This project is a strategy that arose to meet the needs of Jalisco society, including promoting scientific vocations, environmental education and entrepreneurship in the population, although some participations have also been made in other states of the Mexican Republic. The main findings were to promote scientific vocations through science dissemination events that included conferences and workshops, promoting interest in science and technology, entrepreneurship and environmental care. This project means to contributing in the future to the promotion of the next generations of professionals, having a greater impact of environmental and entrepreneurship projects, promoting well-being in society.

¿Por qué es importante este tema?

La divulgación de la ciencia es un puente esencial entre el conocimiento especializado y la sociedad. Su propósito es traducir conceptos complejos a un lenguaje accesible, fortaleciendo así el pensamiento crítico y la cultura científica en la población. Este proceso es fundamental para despertar vocaciones científicas en los jóvenes, impulsar la investigación y concientizar a la sociedad sobre temas de alta relevancia, como la producción de alimentos de manera sostenible y el cuidado del medio ambiente [1].

El presente proyecto surge como una respuesta estratégica a desafíos y oportunidades clave en el estado de Jalisco, con la finalidad de impulsar su desarrollo científico, económico y social.

Afiliaciones:

¹ Tecnológico Nacional de México, Campus Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez. Correo: salvador.gonzalez@tomatlan.tecmm.edu.mx

* Autor de correspondencia: salvador.gonzalez@tomatlan.tecmm.edu.mx



Se fundamenta en la necesidad de conectar el conocimiento académico con la acción práctica, atendiendo simultáneamente el fomento de vocaciones científicas, el cuidado del medio ambiente y el desarrollo de la agricultura sostenible y el emprendimiento [2]. La pregunta central es: ¿De qué manera la divulgación creativa y amigable logra transformar la conciencia ambiental en emprendimientos sostenibles y económicamente viables?

¿Qué sabíamos antes?

La gestación de este proyecto se fundamenta en la observación derivada de la estrecha colaboración y la interacción con una red diversa de actores clave en Jalisco. A través de reuniones de trabajo con autoridades gubernamentales, instituciones académicas, asociaciones no gubernamentales y líderes del sector agrícola, se identificó una necesidad crítica en el estado [3] (Figura 1).

Con base en estas interacciones, se comprendió que existe una oportunidad significativa para impulsar las vocaciones científicas y el emprendimiento en el ámbito de la agricultura sostenible y orgánica. El propósito es atender la necesidad de promover el cuidado de los recursos naturales, fortalecer la educación ambiental y contribuir a la obtención de alimentos inocuos y nutritivos para la sociedad jalisciense a través de la divulgación de la ciencia y la tecnología mediante diversas estrategias.

La motivación principal para llevar a cabo esta iniciativa es una vocación profunda y un compromiso personal con la ciencia y la tecnología, así como la pasión por la formación de capital humano de alta calidad. La experiencia previa en la divulgación de la ciencia ha demostrado que estos esfuerzos tienen un impacto significativo en la formación académica y profesional de los jóvenes de diversos municipios de nuestro estado de Jalisco [4].

¿Cómo funciona la nueva propuesta?

La propuesta representa una oportunidad significativa para impulsar las vocaciones científicas y el emprendimiento en el ámbito de la agricultura sostenible y orgánica a través de cuatro dimensiones fundamentales. En primer lugar, se centra en la organización de eventos, como la Semana Estatal del Conocimiento y la Innovación Jalisco, realizada en vinculación con SOLACYT y COECYTJal en sedes como Mascota y Tomatlán. En segundo lugar, contempla la impartición de talleres y conferencias interactivas que emplean estrategias lúdicas para la enseñanza de la ciencia en diversos municipios de Jalisco y en instituciones externas como la Universidad del Valle de Puebla (Figura 2).

Como tercera dimensión, se implementaron huertos escolares y familiares en planteles del Tecnológico Superior de Jalisco y el CBTA No. 127, los cuales funcionan como espacios demostrativos de manejo agronómico sostenible y uso de fertilizantes orgánicos propios (Figura 3). Finalmente, la propuesta se apoya en el uso constante de plataformas digitales para ampliar el alcance de las actividades y resultados hacia la sociedad [5], [6].



Figura 1: *Gestión y participación en mesas de trabajo con actores clave del ecosistema de ciencia y tecnología en el estado de Jalisco.*



Figura 2: *Conferencia interactiva: La importancia de la investigación en las empresas.*

Casos prácticos y aplicaciones

El proyecto generó un impacto multifacético mediante el fomento de vocaciones científicas a través de eventos que impulsaron el interés tecnológico en niños y jóvenes jaliscienses [1]. Asimismo, se fortaleció la educación ambiental y el emprendimiento con el establecimiento de huertos orgánicos que demuestran métodos de producción sustentable [2]. Actualmente, estos resultados se traducen en aplicaciones comerciales reales, ya que una proporción significativa de estudiantes ha implementado huertos familiares para la producción y comercialización de productos agrícolas propios [3].



Figura 3: *Presentación de resultados del sistema de cultivo hidropónico, destacando la eficiencia y el desarrollo óptimo de nuestra cosecha de lechugas.*

Un caso de estudio específico y exitoso fue el huerto escolar en la Unidad Académica de Tomatlán del Instituto Tecnológico Superior de Jalisco, que impulsó activamente la conciencia ambiental. Esta implementación se ha extendido a otros sectores y delegaciones de Tomatlán, como El Tule y El Tequesquite. En términos de beneficios cuantificables, entre los años 2022 y 2025, la estrategia de divulgación creativa alcanzó a 50,000 personas, logrando transformar la conciencia ambiental en emprendimientos sostenibles con sólida viabilidad económica [2], [3].

¿Qué significa esto para ti?

El proyecto aporta, mediante una divulgación cercana, a la formación de las futuras generaciones de profesionistas, potenciando su espíritu emprendedor [2]. Esta labor fue reconocida en 2023 por el H. Congreso del Estado de Jalisco con la “Condecoración Mariano Bárcena y Ramos” por contribuciones significativas a la ciencia regional.

Se esperan transformaciones sociales integrales centradas en democratizar la información de calidad y fomentar el pensamiento crítico. Esto conducirá a profesionistas con una visión ética y compromiso ambiental, esenciales para adoptar prácticas sostenibles a gran escala ante los desafíos climáticos [6]. Al mismo tiempo, el proyecto actúa como un motor de innovación y movilidad económica al inyectar dinamismo a través de nuevos negocios de impacto social [2].

En el ámbito profesional, esta convergencia entre ciencia y sostenibilidad abre oportunidades en áreas como la Economía Verde (consultores de economía circular), contenidos digitales científicos y emprendimientos de impacto social, transformando el conocimiento en soluciones innovadoras para desafíos globales [7]. No obstante, persisten retos éticos como asegurar la accesibilidad total del contenido y lograr la sostenibilidad financiera a largo plazo.

El futuro que nos espera

La investigación actual se concentra en adaptar modelos de impacto climático a escala local para comunidades rurales y costeras, diseñando además plataformas digitales interactivas de contenido didáctico. Actualmente se ejecutan programas de “ciencia ciudadana” para recopilar datos en tiempo real que refinan las herramientas de adaptación ambiental [2]. A corto plazo, se espera consolidar estas plataformas y obtener al menos 500 conjuntos de datos verificados para generar adaptaciones específicas del modelo climático regional [3].

La visión a largo plazo busca establecer un ecosistema de adaptación autosostenible escalable a todo México mediante alianzas estratégicas [1]. Este futuro evolucionará integrando el Internet de las Cosas (IoT) con sensores en tiempo real, tecnología geoespacial para mapas de vulnerabilidad dinámicos y “Blockchain” para asegurar la integridad de los resultados [4]. Sin embargo, quedan obstáculos por superar, como la estandarización del alto volumen de datos del IoT y la creación de interfaces sencillas que traduzcan la información técnica en alertas accionables para el usuario final [3].

Referencias

- [1] P. S. González, “La educación ambiental: clave para la conservación de los ecosistemas”, *Revista Physios*, vol. 21, págs. 22-24, 2024. dirección: <https://www.physios.mx/articulos/la-educacion-ambiental-clave-para-la-conservacion-de-los-ecosistemas>
- [2] P. S. González, A. S. Huanaco y A. M. Y. Ríos, “Divulgación Creativa y Amigable para fomentar las vocaciones científicas en jóvenes de educación media superior de Mascota, Jalisco”, *Orama. Revista Iberoamericana de Divulgación y Cultura Científica*, vol. 7, págs. 106-110, 2024. dirección: https://www.researchgate.net/publication/384436813_Divulgacion_Creativa_y_Amigable_para_fomentar_las_vocaciones_cientificas_en_jovenes_de_educacion_media_superior_de_Mascota_Jalisco

-
- [3] P. S. González, G. L. A. Macedo y A. M. Y. Ríos, “Un cultivo de conocimientos: Caso de éxito de un huerto escolar en Tomatlán, Jalisco, México”, *Orama. Revista Iberoamericana de Divulgación y Cultura Científica*, 2025. dirección: https://www.researchgate.net/publication/393891047_Un_cultivo_de_conocimientos_Caso_de_exito_de_un_huerto_escolar_en_Tomatlan_Jalisco_Mexico
- [4] P. S. González, “Impacto de la globalización en la seguridad alimentaria”, *Revista en Sentido Figurado*, vol. 5, págs. 82-90, 2021. dirección: https://www.researchgate.net/publication/354204478_Impacto_de_la_globalizacion_en_la_seguridad_alimentaria
- [5] M. Bravo, “Vínculos entre la escuela y la comunidad escolar mediante el huerto escolar”, Tesis de maestría, El Colegio de la Frontera Sur, San Cristóbal de Las Casas, México, 2016. dirección: https://ecosur.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1017/1435/1/100000008954_documento.pdf
- [6] K. Bucher, “Opening garden gates: Teachers making meaning of school gardens in Havana and Philadelphia”, *Teaching and Teacher Education*, vol. 63, págs. 12-21, 2017. DOI: 10.1016/j.tate.2016.12.001 dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0742051X16308174>
- [7] G. Sántiz, “El huerto escolar, oportunidad para fortalecer el trabajo colaborativo y la integración entre los estudiantes de escuelas primarias”, Tesis de maestría, El Colegio de la Frontera Sur, San Cristóbal de Las Casas, México, 2018. dirección: <https://biblioteca.ecosur.mx/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=000040384>

Desarrollo de una aplicación móvil interactiva para la prevención de la degradación auditiva

Development of an interactive mobile application for the prevention of hearing loss

Caballero-Hernández, H.^{1*} , Muñoz-Jiménez, V.¹ , Ramos-Corchado, M. A.¹ 

Historial del artículo

Recibido: 10-mar-2025

Aceptado: 25-abr-2025

Disponible en línea: 30-ago-2025

Palabras clave

ES: Presión sonora, degradación auditiva, análisis de sonido, sordera

EN: Sound pressure, hearing loss, sound analysis, deafness

RESUMEN

Actualmente, la población que está sometida a fuentes sonoras de gran intensidad, es propensa a deteriorar su capacidad auditiva irreversiblemente. Este problema de salud pública se ha intensificado debido al uso prolongado de dispositivos de audio personales, como auriculares, y a la vida en entornos urbanos ruidosos, afectando ya no solo a adultos mayores, sino también a poblaciones jóvenes. Este artículo presenta el desarrollo de una aplicación móvil interactiva diseñada para la prevención de la degradación auditiva mediante la adquisición y procesamiento de niveles de presión sonora en tiempo real. La herramienta se basa en tres partes principales: el análisis acústico de espacios para determinar niveles promedio y picos de ruido, la ejecución de pruebas de audición preventivas mediante tonos que oscilan entre los 250 Hz y 8000 Hz para determinar si existe algún problema de audición, y un módulo de transcripción de voz a texto para apoyar a personas con dificultades de comprensión. El sistema utiliza algoritmos basados en reglas para clasificar la exposición sonora en categorías de riesgo, basándose en umbrales de audición normal y diversos grados de hipoacusia. Las ventajas de esta aplicación móvil residen en la detección temprana de riesgos en entornos cotidianos, como oficinas o dormitorios, y la educación del usuario sobre límites tolerables.

ABSTRACT

Currently, people constantly exposed to high-intensity noise sources are prone to severe and irreversible hearing loss. This public health problem has intensified due to the prolonged use of personal audio devices, such as headphones, and living in noisy urban environments, affecting not only older adults but also younger populations. This article presents the development of an interactive mobile application designed to prevent hearing loss by getting and processing sound pressure levels in real time. The tool is based on three main components: acoustic analysis of spaces to find average and peak noise levels, preventive hearing tests using tones ranging from 250 Hz to 8000 Hz to decide if any hearing problems exist, and a speech-to-text transcription module to support people with comprehension difficulties. The system uses rule-based algorithms to classify noise exposure into risk categories, based on normal hearing thresholds and varying degrees of hearing loss. The advantages of this mobile application lie in the early detection of risks in everyday environments, such as offices or bedrooms, and in educating the user about tolerable limits.

¿Por qué es importante este tema?

El sentido de la audición para los seres humanos es uno de los más importantes, debido a que nos permite ubicarnos y desenvolvernarnos en diversos entornos para desarrollarnos en diversas actividades. Para poder percibir sonidos, en el ser humano este proceso se inicia cuando la aurícula captura las ondas sonoras y las dirige por el meato acústico externo hasta la membrana

Afiliaciones:

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, 50110, Toluca, Estado de México, México. Correo: hcaballero240@profesor.uaemex.mx; vmunozj@uaemex.mx; maramosc@uaemex.mx

* Autor de correspondencia: hcaballero240@profesor.uaemex.mx



timpánica, la cual vibra y activa la cadena de huesecillos formada por el martillo, el incus y el estribo. Estas vibraciones mecánicas son amplificadas y empujadas hacia la cóclea, un órgano lleno de líquido donde se convierten en impulsos eléctricos que viajan a través del nervio coclear hasta el cerebro para ser interpretados como sonidos. Simultáneamente, los canales semicirculares supervisan el equilibrio y la trompa de Eustaquio regula la presión interna para que todo el sistema funcione correctamente [1]. En la Figura 1 se presenta un esquema del sistema auditivo humano, mientras que en la Tabla 1 se describen con mayor detalle las partes que componen este sistema.

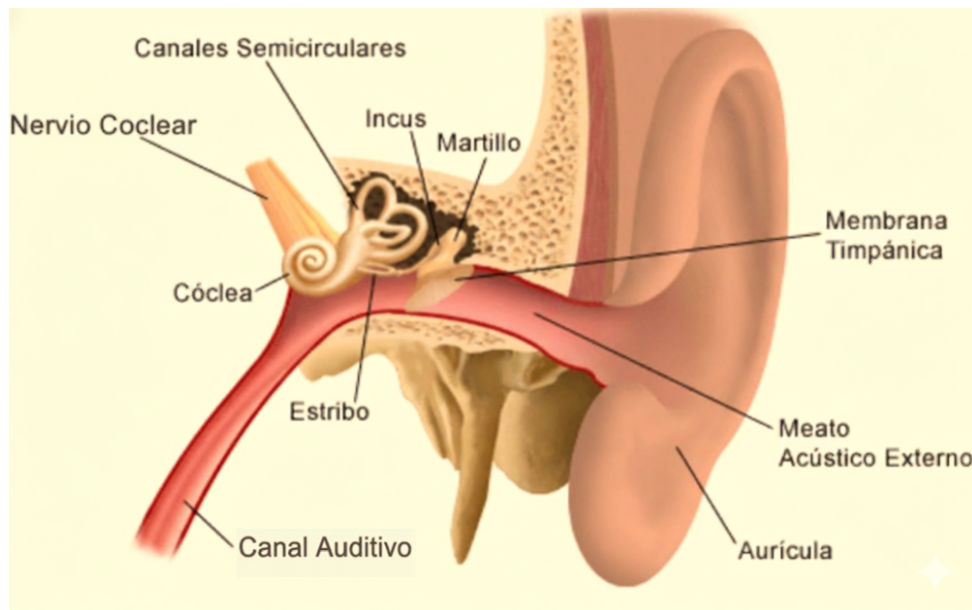


Figura 1: Partes del sistema auditivo humano [2].

Cuando una persona tiene problemas de audición por la exposición a niveles altos de ruido o enfermedades empieza un proceso de degradación auditiva. Aunque es una tendencia que afecta de manera más notable a adultos mayores de 50 años, el uso constante de audífonos y la vida en entornos urbanos ruidosos ha puesto en riesgo a poblaciones más jóvenes [4], [5], [6]. Cuando una persona empieza a sufrir pérdida de la audición se le denomina hipoacusia, de la cual existen diversos niveles, como se muestra en la Tabla 2.

Generalmente, el desarrollo de la hipoacusia se debe al uso de dispositivos como audífonos por periodo prolongado y de manera constante, exposición a fuentes de ruido constante y enfermedades o medicamentos que afectan el sistema auditivo [8], [9], siendo unos de los desafíos actuales para ayudar a la población que sufre problemas de audición.

¿Qué sabíamos antes?

Tradicionalmente, la evaluación de la salud auditiva dependía de equipos comerciales costosos y procedimientos presenciales en centros especializados. Sin embargo, las soluciones actuales han evolucionado hacia la integración de tecnologías móviles y el análisis de factores individuales,

Tabla 1: Descripción de las partes del sistema auditivo de un ser humano [3].

Partes del sistema auditivo	Descripción
Aurícula (Pabellón auricular)	La parte visible de la oreja que capta las ondas sonoras y las dirige hacia el canal auditivo.
Meato acústico externo	Conducto que transporta el sonido desde el exterior hasta el tímpano.
Membrana timpánica (Tímpano)	Membrana delgada que vibra cuando las ondas sonoras chocan con ella, marcando el inicio del oído medio.
Martillo (Malleus)	El primero de los tres huesecillos; está conectado al tímpano y transmite las vibraciones al incus.
Incus (Yunque)	Huesecillo intermedio que actúa como puente para transmitir las vibraciones hacia el estribo.
Estribo (Stapes)	El hueso más pequeño del cuerpo; presiona contra la ventana oval para transmitir el sonido al oído interno.
Cóclea	Estructura en forma de caracol que transforma las vibraciones mecánicas en impulsos nerviosos eléctricos.
Nervio coclear	Transporta las señales eléctricas generadas en la cóclea directamente al cerebro para ser procesadas.
Canales semicirculares	Estructuras encargadas de mantener el equilibrio y detectar la posición de la cabeza en el espacio.
Canal auditivo (trompa de Eustaquio)	Conducto que comunica el oído medio con la faringe para equilibrar la presión del aire.

Tabla 2: Niveles de capacidad auditiva según la percepción de decibelios (dB) [7].

Tipo de hipoacusia	Capacidad auditiva
Audición normal	Percibe sonidos por arriba de los 20 dB
Hipoacusia leve	Percibe entre 26 y 40 dB; dificultad para entender el habla
Hipoacusia moderada	Percibe entre 41 y 60 dB; requiere aparatos auditivos
Hipoacusia grave	Percibe entre 61 y 80 dB; requiere prótesis o implantes
Hipoacusia profunda	Rango superior a 81 dB

como la edad y la memoria de trabajo, para entender la variabilidad en la respuesta de los usuarios al procesamiento de señales en audífonos. Los métodos convencionales de diagnóstico, como la otoscopia neumática manual o el cribado auditivo neonatal (NHS, por sus siglas en inglés) basado exclusivamente en infraestructura hospitalaria, presentaban barreras de acceso para poblaciones remotas. Aunque efectivos, estos enfoques carecían de la capacidad de monitoreo constante y automático que exigen los entornos urbanos ruidosos actuales. El avance tecnológico actual ha permitido una transición hacia el uso de sensores inteligentes y algoritmos avanzados que procesan datos en tiempo real. La implementación de Redes Neuronales Convolucionales (CNN) para analizar imágenes médicas y el uso de Redes Inalámbricas de Sensores Acústicos (WASNs) para el reconocimiento de eventos sonoros marcan un hito en la monitorización ambiental y clínica. Considerando lo anterior, existen diversos estudios que validan este cambio de paradigma como se presenta a continuación:

Diagnóstico asistido por IA: Byun et al. [10] lograron predecir la pérdida auditiva conductiva con una precisión del 94.1 % mediante aprendizaje profundo aplicado a video otoscopia.

Reconocimiento acústico: Luo et al. [11] propusieron sistemas integrales para la monitorización de ruido urbano y eventos específicos como gritos o cláxones. Mientras que Souza et al. [12] investigaron cómo las características individuales (edad, memoria de trabajo y grado de pérdida auditiva) influyen en la respuesta de los usuarios al procesamiento de la señal en audífonos en entornos cotidianos.

Sistemas en tiempo real: Diehl [13] presentó un sistema de eliminación de ruido por deep learning que se ejecuta directamente en dispositivos móviles.

Descentralización (mHealth): Madzivhandila et al. [14] demostraron que dispositivos basados en smartphones para emisiones otoacústicas (hearOAE) tienen un rendimiento comparable a los equipos comerciales, validando su potencial para servicios de salud descentralizados.

Tomando en cuenta los avances actuales sobre la medición de la audición y la creciente crisis de salud en este contexto, se ha planteado la siguiente pregunta: ¿De qué manera puede la tecnología móvil actual servir como una herramienta accesible de cribado y análisis sonoro en diversos espacios para prevenir daños irreversibles en el sistema auditivo? Este artículo ofrece un panorama sobre el desarrollo de una aplicación interactiva que no solo adquiere niveles de presión sonora en tiempo real para educar al usuario sobre los umbrales tolerables, sino que también permite realizar pruebas de audición preventivas y utilizar funciones de voz a texto para mejorar la comunicación. Al integrar funciones de monitoreo ambiental y diagnóstico temprano, la propuesta busca descentralizar los servicios de salud auditiva y proporcionar un soporte vital para mejorar la calidad de vida de poblaciones vulnerables que sufren de diversos grados de hipoacusia.

¿Cómo funciona la nueva propuesta?

El sistema se basa en la creación de una herramienta capaz de realizar un análisis acústico de espacios mediante el procesamiento de señales capturadas directamente por los sensores del

dispositivo móvil. La aplicación transforma la presión sonora del entorno en datos (decibelios) para evaluar la salud auditiva del usuario. Para la construcción de la propuesta se ha seguido la siguiente metodología presentada en la Figura 2.

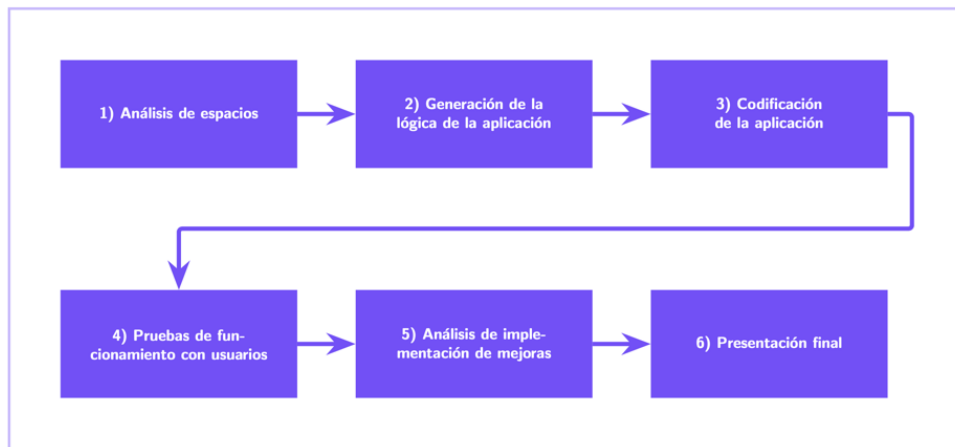


Figura 2: Metodología para la construcción de la herramienta de análisis sonoro.

1) Análisis de espacios. En esta fase inicial se identificaron y caracterizaron los entornos cotidianos donde los usuarios pasan la mayor parte del tiempo (como dormitorios, oficinas y exteriores). Se determinaron los umbrales de ruido aceptables para cada escenario, estableciendo la línea base para que la aplicación pueda diferenciar entre un ambiente saludable y uno perjudicial.

2) Generación de la lógica de la aplicación. Se estructuró el sistema de reglas que permite procesar los datos capturados por el micrófono. En esta etapa se programaron los criterios de evaluación que comparan los decibelios en tiempo real con los estándares de salud auditiva y los diferentes grados de hipoacusia.

3) Codificación de la aplicación: Consiste en el desarrollo técnico y la implementación del software. Se integraron los tres módulos principales: el medidor de ruido (procesamiento de señales), la prueba de audición (reproducción de frecuencias de 250 Hz a 8000 Hz) y la herramienta de voz a texto (VaT) para accesibilidad. La arquitectura básica de la aplicación móvil se puede observar en la Figura 3.

4) Pruebas de funcionamiento con usuarios: Se realizaron pruebas de campo para validar la precisión de la herramienta. En esta etapa se midieron niveles reales (en oficinas, dormitorios y exteriores) y se recolectó retroalimentación sobre la usabilidad de la interfaz y la claridad de las notificaciones preventivas.

5) Análisis de implementación de mejoras. Tras las pruebas, se analizaron los errores detectados y las sugerencias de los usuarios. Se ajustaron parámetros como la frecuencia de las notificaciones (configurables por el usuario) y se optimizó la respuesta del sistema ante picos de ruido elevados para garantizar alertas inmediatas y precisas.

6) Presentación final. Es la etapa de consolidación del proyecto, donde se verifica que la aplicación cumple con el objetivo de descentralizar el cribado auditivo. Se documentan los resultados finales, demostrando cómo la tecnología móvil puede actuar como un mecanismo preventivo eficaz para mejorar la calidad de vida y la salud auditiva.

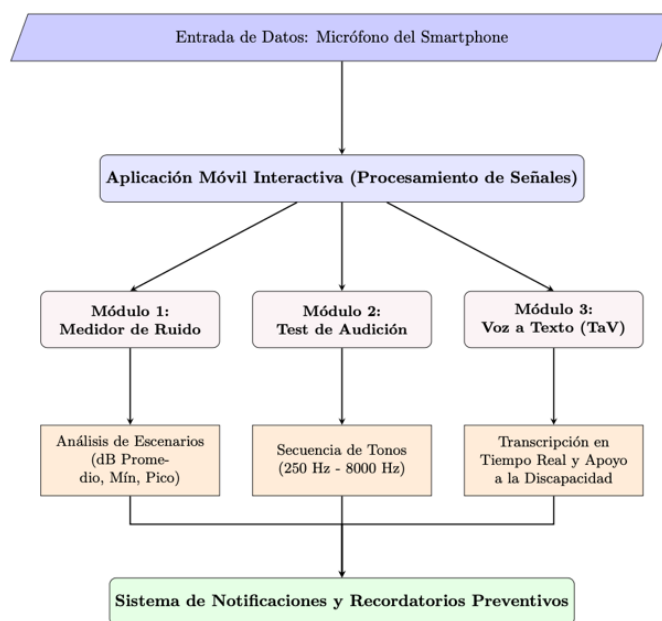


Figura 3: Diagrama de la estructura lógica de la herramienta de análisis sonoro.

Una vez que se ha codificado la aplicación para dispositivos móviles con sistema operativo Android 13 y puesto en ejecución, se han obtenido las funciones codificadas de la siguiente forma como se presentan en la Figura 4. La Figura 4 ilustra las funciones integradas en la App de Salud Auditiva, comenzando con el inicio de la App (inciso a), donde se despliega la interfaz principal que centraliza el acceso a los tres pilares fundamentales del sistema: el Test de Audición, el Medidor de Ruido y la función de Voz a Texto. Al navegar hacia la función de medición de ruido (inciso b), el usuario accede a una interfaz de adquisición de datos diseñada para capturar los niveles de presión sonora a través del micrófono, permitiendo además la selección de una ubicación específica para visualizar los decibelios en tiempo real. Por otro lado, la función voz a texto (VaT, inciso c) se presenta como una herramienta de accesibilidad esencial que transcribe conversaciones de manera inmediata, sirviendo de apoyo directo para personas que presentan dificultades de comprensión o discapacidad auditiva. Finalmente, el sistema incluye una sección dedicada a la configuración de notificaciones (inciso d), la cual permite personalizar la frecuencia de los recordatorios preventivos según las necesidades del usuario, facilitando así el seguimiento constante de la salud auditiva.

A diferencia de los métodos tradicionales, esta herramienta ofrece:

Diagnóstico temprano. Permite detectar la pérdida de percepción en rangos críticos antes de que la hipoacusia se agrave.

Retroalimentación educativa. Alerta sobre riesgos inmediatos, como niveles pico de 90.27 dB en áreas de descanso, permitiendo acciones correctivas al instante.

Inclusión. La función de VaT actúa como un soporte de accesibilidad, permitiendo visualizar conversaciones en tiempo real para quienes ya presentan dificultades de comprensión.

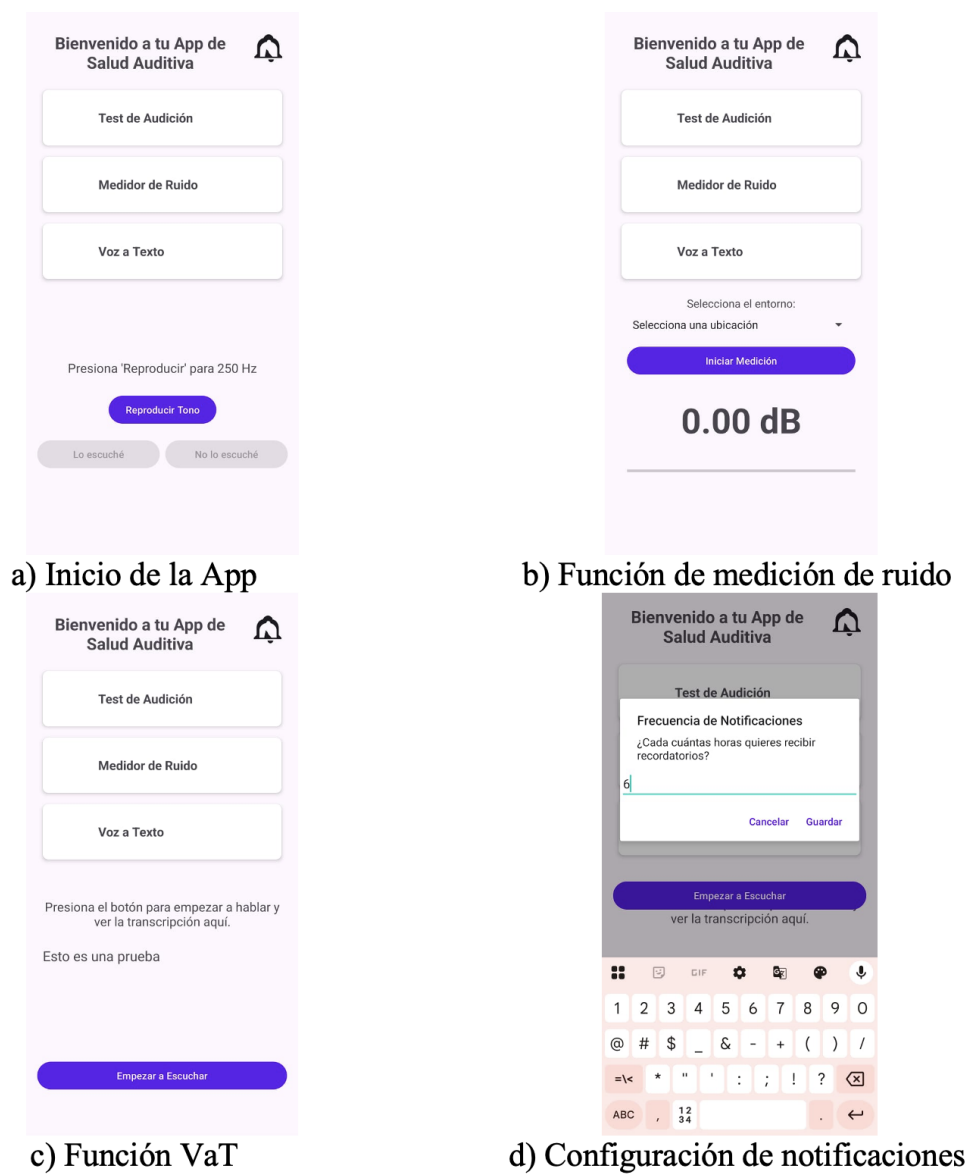


Figura 4: Funciones integradas a la App de Salud Auditiva.

Casos prácticos y aplicaciones

La aplicación desarrollada se ha probado en un dispositivo Xiaomi POCO M3 Pro 5G con sistema operativo Android 13, para analizar su desempeño en un entorno real y verificar el funcionamiento de las tres funciones básicas de la herramienta. Durante las pruebas de la aplicación sobre la medición de ruido se evaluaron diversos escenarios cotidianos con resultados específicos, como se muestra en la Figura 5:

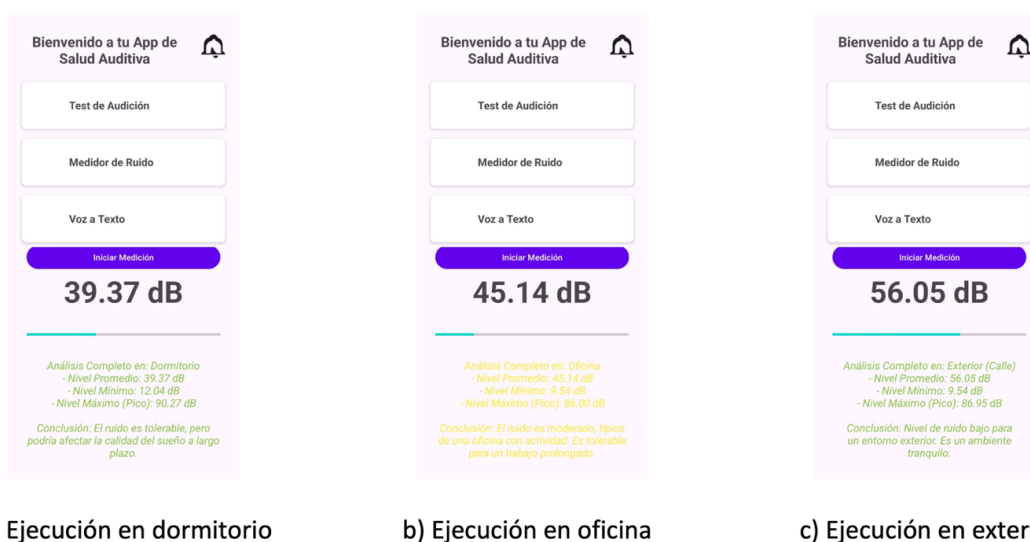


Figura 5: Ejecución de las pruebas de análisis sonoro en distintos entornos.

Dormitorio (inciso a): Se registró un nivel promedio de 39.37 dB. Aunque se clasificó como tolerable, el sistema emitió una advertencia sobre el riesgo potencial para la calidad del sueño ante niveles pico de hasta 90.27 dB registrados en el mismo espacio.

Oficina (inciso b): Se detectó un nivel moderado de 45.14 dB con picos de 86.00 dB, concluyendo que es un ambiente apto para el trabajo prolongado.

Exterior (Calle, inciso c): Se midió un promedio de 56.05 dB, identificándolo como un entorno tranquilo para una ubicación urbana.

Los resultados del sistema para función de tonos se detallan en la Figura 6, la cual ilustra la ejecución secuencial del mecanismo de Test de Audición diseñado para evaluar la capacidad de percepción del usuario en rangos de frecuencia críticos. El proceso inicia con la Reproducción de tonos (inciso a), etapa en la que la aplicación emite una secuencia controlada de frecuencias que comienza en los 250 Hz y progresa paulatinamente. Durante este flujo, el usuario interactúa con la interfaz confirmando si percibe el sonido mediante los botones “Lo escuché” o “No lo escuché”. Al alcanzar la finalización de reproducción de tonos (inciso b), el software concluye la emisión tras haber recorrido el espectro sonoro hasta los 8000 Hz. La presentación de resultados (inciso c) despliega un análisis de audición detallado y genera un perfil de salud auditiva preliminar. En esta captura se observa una conclusión positiva que califica la audición como “muy saludable” e integra recomendaciones preventivas automáticas para que el usuario continúe protegiendo su sistema auditivo de exposiciones prolongadas a ruidos fuertes. Finalmente, la función VaT (inciso

d) es probada para personas con dificultades de comprensión, permitiendo la visualización de conversaciones en tiempo real.

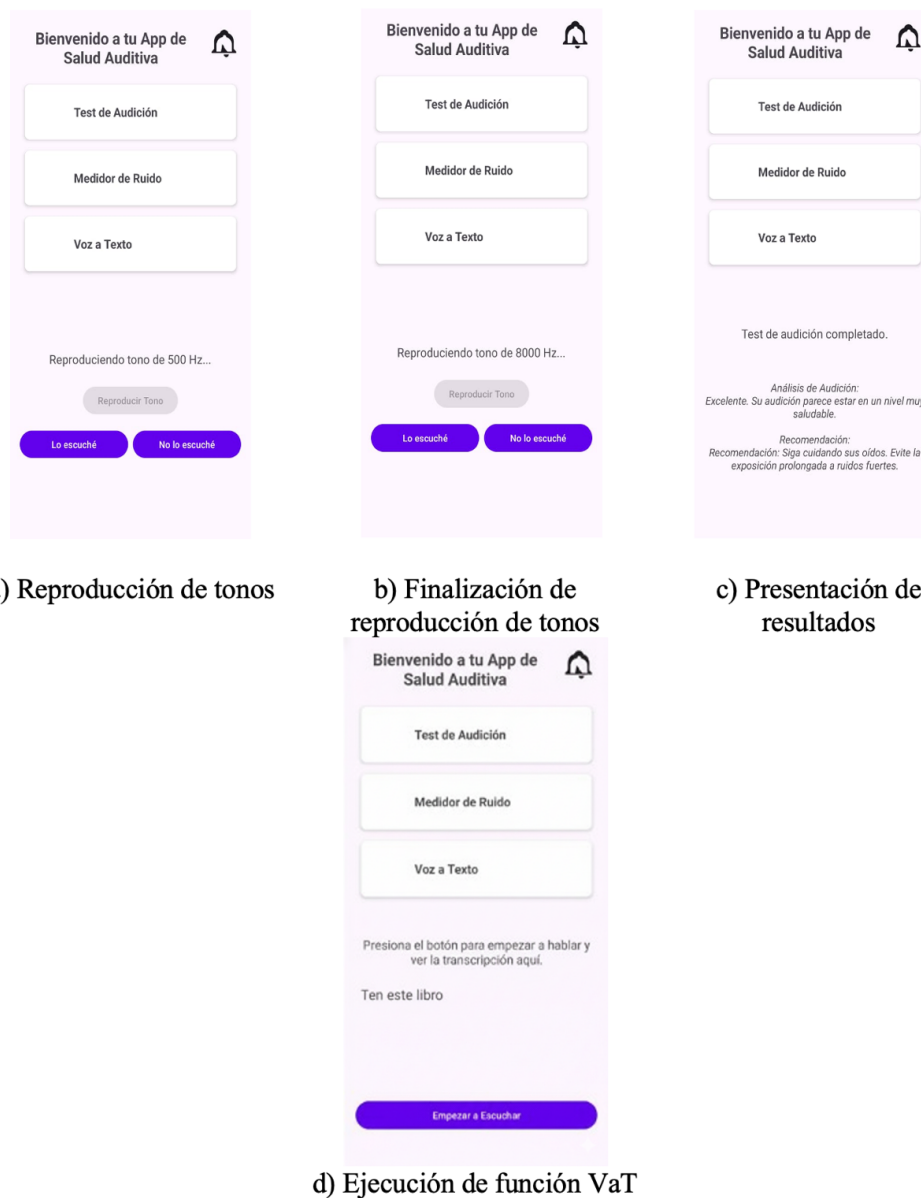


Figura 6: Ejecución de la función de tonos y de la función VaT.

¿Qué significa esto para ti?

La implementación de esta tecnología móvil representa un cambio significativo en la gestión del bienestar individual y colectivo. En el ámbito del impacto en la vida personal, la herramienta permite que cualquier usuario monitoree su entorno sonoro cotidiano y detecte de forma temprana si está perdiendo la capacidad de percibir sonidos en rangos críticos antes de que una hipoacusia se vuelva grave. Esto es altamente importante, debido a que la degradación auditiva es una tendencia creciente por el uso constante de auriculares y la vida en ciudades ruidosas, afectando

no solo a adultos mayores de 50 años, sino también a poblaciones jóvenes.

En cuanto a las transformaciones sociales esperadas, esta tecnología tiene el potencial de descentralizar los servicios de cribado auditivo, eliminando la necesidad de infraestructura hospitalaria compleja para evaluaciones preliminares. Esto mejora directamente la calidad de vida en poblaciones vulnerables y fomenta una cultura de prevención y educación ambiental sobre los umbrales de ruido tolerables.

Asimismo, surgen oportunidades profesionales emergentes en el desarrollo de herramientas de apoyo a la discapacidad, como la función de VaT, que facilita la inclusión de personas con dificultades de comprensión al permitirles visualizar conversaciones en tiempo real. Finalmente, el despliegue de estas soluciones conlleva consideraciones éticas y desafíos importantes, principalmente enfocados en garantizar la precisión de los diagnósticos digitales y la responsabilidad de alertar sobre riesgos potenciales en espacios de descanso donde niveles pico de ruido (como 90.27 dB) pueden afectar la salud a largo plazo.

El futuro que nos espera

El futuro de la salud auditiva digital se encuentra en una etapa de transformación profunda, donde la investigación actual busca trascender los sistemas basados en reglas simples para dar paso a modelos avanzados de CNN capaces de identificar automáticamente diversas fuentes de ruido y eventos acústicos específicos. A corto plazo, se prevé la implementación de protocolos de audiometría clínica directamente en los dispositivos móviles, lo que permitirá ofrecer diagnósticos de alta precisión sin depender de una infraestructura hospitalaria compleja o centralizada.

Esta evolución facilitará una convergencia tecnológica sin precedentes, integrando el procesamiento de señales en tiempo real con herramientas de inteligencia artificial para la eliminación de ruido y la video otoscopía neumática automatizada. A largo plazo, la visión se centra en democratizar el acceso a la salud mediante tecnologías mHealth que mejoren la calidad de vida de poblaciones vulnerables a través de servicios de cribado auditivo totalmente descentralizados. No obstante, aún persisten obstáculos pendientes por superar, principalmente relacionados con la estandarización de los sensores de los smartphones frente a equipos de grado médico y la necesidad de validar estos sistemas en entornos cotidianos altamente variables para garantizar resultados clínicos confiables.

Referencias

- [1] J. E. Hall y A. C. Guyton, *Tratado de fisiología médica*, 14.^a ed. España: Elsevier, 2021.
- [2] Stanford Medicine Children's Health. "Otitis media (infección del oído medio)", visitado 3 de ene. de 2026. dirección: <https://www.stanfordchildrens.org/es/topic/default?id=otitis-media-infecci243n-del-o237do-medio-90-P05164>
- [3] E. R. Kandel, J. D. Koester, S. H. Mack y S. A. Siegelbaum, *Principios de Neurociencia*, 6.^a ed. Madrid, España: McGraw-Hill, 2021, págs. 590-615.

-
- [4] L. C. Obregón, “Evidencias para la prevención de la pérdida auditiva inducida por ruido laboral”, Reporte, Repositorio Académico - UPOCH, 2024.
- [5] A. Gomes de Macedo-Bacurau et al., “Deficiencia auditiva en población mayor de 55 años y su relación con las enfermedades crónicas y la salud percibida”, *Revista de Salud Pública*, vol. 97, n.º 3, 2023.
- [6] World Health Organization, “World Report on Hearing”, Geneva, Switzerland, 2021. visitado 30 de ago. de 2025. dirección: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240020481>
- [7] L. E. Humes, “The World Health Organization’s hearing-impairment grading system: an evaluation for unaided communication in age-related hearing loss”, *Int. J. Audiol.*, vol. 58, n.º 1, págs. 12-20, 2019. DOI: [10.1080/14992027.2018.1518598](https://doi.org/10.1080/14992027.2018.1518598)
- [8] J. A. Sierra et al., “Salud auditiva y exposición a ruido ambiental en población de 18 a 64 años de Bogotá, Colombia, entre el 2014 y el 2018”, *Revista de Salud Pública*, vol. 44, n.º 2, 2024.
- [9] K. S. Lastre Meza et al., “Análisis de correlación entre la audición y la flexibilidad cognitiva en una población adulta mayor de Sincelejo, Colombia”, *Revista de la Facultad de Medicina*, vol. 25, n.º 47, 2022.
- [10] H. Byun et al., “Automatic Prediction of Conductive Hearing Loss From Video Pneumatic Otoscopy Using Deep Learning”, *Ear Hear.*, vol. 43, n.º 5, págs. 1563-1573, 2022. DOI: [10.1097/AUD.0000000000001217](https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000001217)
- [11] L. Luo, H. Qin, X. Song, M. Wang, H. Qiu y Z. Zhou, “Wireless Sensor Networks for Noise Measurement and Acoustic Event Recognitions in Urban Environments”, *Sensors*, vol. 20, n.º 7, pág. 2093, 2020. DOI: [10.3390/s20072093](https://doi.org/10.3390/s20072093)
- [12] P. Souza, K. Arehart, T. Schoof, M. Anderson, D. Strori y L. Balmert, “Understanding Variability in Individual Response to Hearing Aid Signal Processing: Role of Cognitive and Auditory Factors”, *Ear Hear.*, vol. 40, n.º 6, págs. 1280-1292, 2019. DOI: [10.1097/AUD.0000000000000717](https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000717)
- [13] P. U. Diehl et al., “Deep learning noise reduction system running in real time on a mobile phone and streamed to a hearing aid”, *Front. Med. Eng.*, vol. 1, 2023. DOI: [10.3389/fmede.2023.1281904](https://doi.org/10.3389/fmede.2023.1281904)
- [14] A. G. Madzivhandila, T. le Roux y L. B. de Jager, “Neonatal hearing screening using a smartphone-based otoacoustic emission device: A comparative study”, *Int. J. Pediatr. Otorhinolaryngol.*, vol. 177, pág. 111 862, 2024. DOI: [10.1016/j.ijporl.2024.11186](https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2024.11186)

Residuos electrónicos como fuente secundaria de tierras raras

Electronic waste as a secondary source of rare earth elements

Martínez-Montoya, P. A.^{1*} , Jiménez-Romero, T. d. R.¹ , Carreja-Jota, M. L.¹ ,
Morales-Ramírez, A. d. J.¹ 

Historial del artículo

Recibido: 15-abr-2025

Aceptado: 10-jun-2025

Disponible en línea: 30-ago-2025

Palabras clave

ES: Tierras raras, Elementos críticos, Basura electrónica, Materiales estratégicos, Reciclaje

EN: Rare earths, Critical elements, Electronic waste, Strategic materials, Recycling

RESUMEN

Las tierras raras se han consolidado como materias primas críticas debido a su papel estratégico en el desarrollo tecnológico y a la alta concentración de su producción, liderada por China. Aunque no son escasas en la corteza terrestre, su baja concentración natural y la complejidad de su separación limitan su disponibilidad económica. En México, ante la ausencia de yacimientos explotables, la basura electrónica surge como una fuente secundaria clave para su recuperación bajo esquemas de economía circular. Este artículo revisa la naturaleza de estos elementos, sus propiedades funcionales y su impacto tecnológico, analizando además los retos del reciclaje como alternativa sostenible a la minería tradicional para garantizar el suministro futuro de materiales estratégicos.

ABSTRACT

Rare earth elements are strategic raw materials for technological development, with production heavily concentrated in China. Despite not being scarce in the Earth's crust, their low concentration and complex purification limit economic availability. In Mexico, where exploitable deposits are lacking, electronic waste is a vital secondary source for recovery within circular economy frameworks. This article reviews the nature, functional properties, and technological impact of these elements, discussing the challenges and opportunities of electronic waste recycling as a sustainable alternative to traditional mining, aiming to secure the future supply of critical materials.

¿Por qué es importante este tema?

En las últimas décadas, las tierras raras se han convertido en materias primas críticas debido a su amplia gama de aplicaciones en la industria tecnológica y a la extrema concentración de su suministro global, donde China controla más del 80 % de la producción. Actualmente, México carece de yacimientos minerales económicamente explotables para estos recursos, lo que ha impulsado la búsqueda de fuentes secundarias. Entre las alternativas más prometedoras destaca la basura electrónica, que actúa como un repositorio estratégico de estos metales [1], [2].

El planteamiento actual se centra en implementar procesos de recolección y procesamiento para recuperar tierras raras de los desechos tecnológicos. Esto invita a explorar la naturaleza de

Afiliaciones:

¹ Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas. Ciudad de México, México. Correo: adrianpedrom@gmail.com; teresitajimenezesique@gmail.com; mcarreraj@ipn.mx; amoralesra@ipn.mx

* Autor de correspondencia: adrianpedrom@gmail.com



estos elementos, determinar por qué se les denomina “raros” a pesar de su abundancia relativa en la corteza terrestre y comprender las propiedades que los hacen indispensables. Asimismo, es crucial analizar el potencial de la basura electrónica como pilar de la minería urbana para asegurar la autonomía tecnológica [3].

¿Qué sabíamos hasta ahora?

Las tierras raras comprenden un grupo de 17 elementos químicos: los 15 lantánidos (Lantano a Lutecio), junto con el Itrio y el Escandio (Figura 1). Para facilitar su estudio, se dividen usualmente en tierras raras ligeras y pesadas. Desde 2011, organismos internacionales como el Departamento de Energía de EE. UU. han clasificado a varios de estos elementos como críticos debido a factores geopolíticos, restricciones comerciales y riesgos ambientales asociados a su obtención [1], [2].

La
lantano

Ce
cerio

Pr
praseodimio

Nd
neodimio

Pm
prometio

Sm
samario

metales alcalinos

metales alcalinotérreos

Sc
escandio

Y
itrio

metales de transición

metales térreos

carbonoides

nitrogenoides

calcógenos

halógenos

gases nobles

La
lantano

Ce
cerio

Pr
praseodimio

Nd
neodimio

Pm
prometio

Sm
samario

Eu
europio

Gd
gadolinio

Tb
terbio

Dy
disprosio

Ho
holmio

Er
erbio

Tm
tulio

Yb
ytterbio

Lu
lutecio

actínidos

Gd
gadolinio

Tb
terbio

Dy
disprosio

Ho
holmio

Er
erbio

Tm
tulio

Yb
ytterbio

Lu
lutecio

actínidos

Figura 1: Elementos de tierras raras y su ubicación en la tabla periódica.

La criticidad de estos metales se evalúa según su riesgo de suministro y su importancia económica (Tabla 1). El mayor obstáculo en su industria ha sido el impacto ambiental de los procesos metalúrgicos tradicionales; la similitud en las propiedades químicas de estos elementos obliga a emplear métodos de separación complejos y contaminantes. Ante esto, se han desarrollado estrategias de reciclaje mediante procesos híbridos que integran técnicas hidro y pirometalúrgicas [4], [5].

Funcionamiento e importancia tecnológica

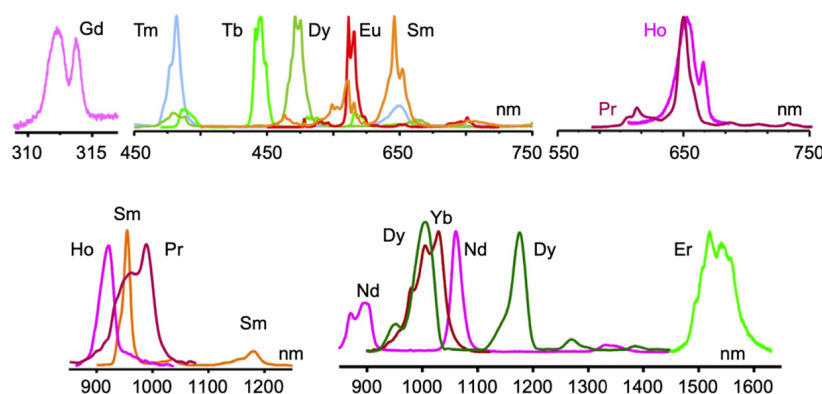
A diferencia de lo que sugiere su nombre, las tierras raras no son escasas en la naturaleza; su carácter estratégico deriva de las bajas concentraciones en que se presentan y la dificultad

Tabla 1: *Evaluación crítica de elementos de tierras raras según restricciones y riesgos.*

Metal	Suministro	Geografía	Riesgo Político	General
Dy, Eu, Tb, Y	Alto	Alto	Alto	Alto
Pr, Nd	Medio	Alto	Alto	Alto
La, Ce, Sm, Gd	Bajo	Medio	Alto	Medio

para purificarlas. Sus propiedades funcionales —magnéticas, ópticas y catalíticas— radican en su configuración electrónica, específicamente en el llenado de los orbitales 4f, los cuales están protegidos por capas externas. Este blindaje electrónico las hace insensibles al entorno químico inmediato, permitiendo fenómenos como el magnetismo permanente y la luminiscencia selectiva [6].

En el ámbito práctico, estas propiedades permiten fabricar imanes permanentes de neodimio-hierro-boro que reducen el tamaño de motores eléctricos y generadores de alta eficiencia. Además, elementos como el europio e itrio son esenciales en la iluminación de estado sólido debido a su capacidad para emitir luz en longitudes de onda precisas (Figura 2). El impacto de estos materiales es desproporcionado respecto a la pequeña cantidad utilizada, optimizando el desempeño tecnológico global [3], [6].

**Figura 2:** *Espectros de emisión de iones lantánidos trivalentes.*

Uno de los campos más beneficiados es la luminiscencia, donde las tierras raras actúan como fósforos que transforman energía en radiación visible. La singular estructura electrónica de elementos lantánidos les confiere la capacidad de absorber y emitir energía con espectros característicos (Figura 3). Aunque se emplean en proporciones mínimas, su contribución es determinante para la eficiencia de productos de alto valor agregado, desde pantallas hasta catalizadores industriales (Tabla 2) [3], [7].

Impacto en la vida diaria y futuro

Las tierras raras son invisibles pero omnipresentes; permiten la portabilidad de teléfonos, la eficiencia de audífonos y la autonomía de vehículos eléctricos (Figura 4). Al integrarse en

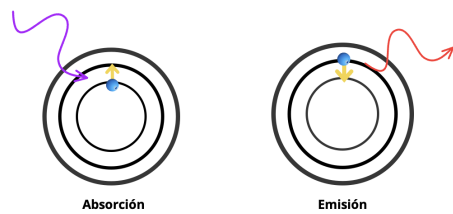


Figura 3: Ejemplo de absorción y emisión de energía en tierras raras.

Tabla 2: Principales aplicaciones comerciales de los elementos de tierras raras.

Elemento	Aplicaciones principales
Lantano (La)	Baterías, aleaciones metálicas, catalizadores, óptica y cerámica.
Cerio (Ce)	Control de emisiones, pulido de vidrio, fósforos y refinación.
Neodimio (Nd)	Imanes permanentes de alta potencia y electrónica.
Europio (Eu)	Fósforos para pantallas e iluminación eficiente.
Disprosio (Dy)	Imanes permanentes resistentes a temperatura.
Erbio (Er)	Comunicaciones por fibra óptica y láseres médicos.

tecnologías cotidianas, influyen directamente en nuestra calidad de vida y comunicación. Sin embargo, su consumo masivo genera una creciente preocupación por el manejo de residuos. Recuperar estos materiales de los aparatos desechados no solo mitiga la contaminación, sino que fortalece la conciencia ambiental y la responsabilidad circular [1], [7].

Esta transición hacia la minería urbana abre puertas a nuevas vocaciones en ingeniería de materiales, química y gestión ambiental. A corto plazo, se requiere robustecer las redes de recolección de basura electrónica para satisfacer la demanda de la digitalización. A largo plazo, la visión es consolidar un ecosistema de economía circular donde la dependencia de la extracción minera sea mínima. A pesar de retos como los costos de reciclaje y la complejidad técnica, la innovación en procesos limpios garantizará un futuro tecnológico sostenible y éticamente responsable [8], [9].

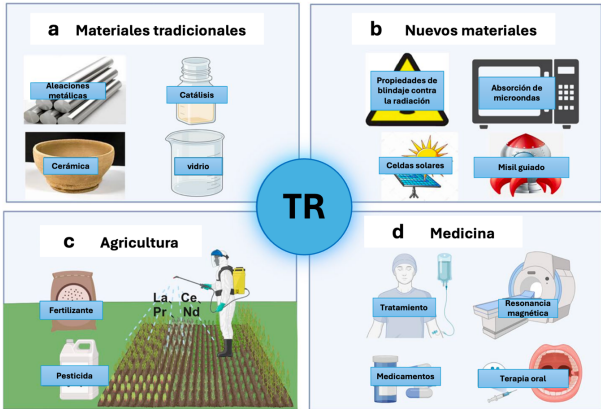


Figura 4: Aplicaciones de tierras raras en la vida cotidiana.

Referencias

- [1] V. Balaram, “Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact”, *Geoscience Frontiers*, vol. 10, n.º 4, 2019. DOI: [10.1016/j.gsf.2018.12.005](https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005)
- [2] European Commission, “Methodology for establishing the EU list of Critical Raw Materials”, Publications Office of the European Union, 2017.
- [3] K. Binnemans et al., “Recycling of rare earths: A critical review”, *Journal of Cleaner Production*, 2013. DOI: [10.1016/j.jclepro.2012.12.037](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.037)
- [4] L. Chen et al., “An overview on membrane strategies for rare earths extraction and separation”, *Separation and Purification Technology*, 2018. DOI: [10.1016/j.seppur.2017.12.053](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.12.053)
- [5] R. Moss et al., “Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector: Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies”, Joint Research Centre of the European Commission, EUR 25994 EN, 2013.
- [6] R. Ganguli y D. R. Cook, “Rare earths: A review of the landscape”, *MRS Energy & Sustainability*, 2018. DOI: [10.1557/mre.2018.7](https://doi.org/10.1557/mre.2018.7)
- [7] A. S. Patil, A. V. Patil, C. G. Dighavkar, V. A. Adole y U. J. Tupe, “Synthesis techniques and applications of rare earth metal oxides semiconductors: A review”, *Chem Phys Lett*, vol. 796, 2022. DOI: [10.1016/j.cplett.2022.139555](https://doi.org/10.1016/j.cplett.2022.139555)
- [8] S. Paul, “E-Waste Recycling Challenges and Opportunities”, *RESEARCH REVIEW International Journal of Multidisciplinary*, vol. 7, n.º 6, 2022. DOI: [10.31305/rrijm.2022.v07.i06.025](https://doi.org/10.31305/rrijm.2022.v07.i06.025)
- [9] S. Massari y M. Ruberti, “Rare earth elements as critical raw materials: Focus on international markets and future strategies”, *Resources Policy*, vol. 38, n.º 1, 2013. DOI: [10.1016/j.resourpol.2012.07.001](https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2012.07.001)

Amortiguadores de fluido viscoso para reducir las vibraciones provocadas por el viento en edificios altos

Fluid viscous dampers to reduce wind-induced vibrations in tall buildings

Bañuelos-García, F.^{1*} , Dionisio-Aguilar, A. M. O.¹ 

Historial del artículo

Recibido: 10-mar-2025

Aceptado: 25-abr-2025

Disponible en línea: 30-ago-2025

Palabras clave

ES: Viento, edificios altos, control de vibraciones, amortiguadores de fluido viscoso

EN: Wind, tall buildings, vibration control, fluid viscous dampers

RESUMEN

Los edificios altos en zonas costeras pueden experimentar vibraciones apreciables durante vientos fuertes; aunque no siempre son peligrosas, afectan el servicio y el confort de los ocupantes y pueden incrementar demandas en ciertos elementos. Esto obliga a buscar soluciones que controlen el movimiento sin rigidizar las construcciones. Este artículo plantea una pregunta central: ¿puede el amortiguamiento suplementario con amortiguadores de fluido viscoso (AFV) reducir de forma eficiente la respuesta dinámica por viento en edificios altos, y cómo conviene distribuirlos en altura y en planta?. Se describe un enfoque de diseño y evaluación basado en modelación numérica comparativa: un modelo base del edificio con AFV, considerando configuraciones en función del algún parámetro de diseño como son las distorsiones de entrepiso. El objetivo es cuantificar mejoras en variables de servicio (desplazamientos, distorsiones, velocidades y aceleraciones) y proponer criterios prácticos de ubicación. En conjunto, la propuesta busca traducir la tecnología de control de vibraciones a un procedimiento replicable para proyectos en México, con énfasis en condiciones de viento representativas de regiones costeras y en beneficios medibles para desempeño y confort.

ABSTRACT

Tall buildings in coastal zones can experience noticeable vibrations during strong winds; although they are not always dangerous, they can degrade serviceability and occupant comfort and may increase demands on certain structural elements. This drives the need for solutions that control motion without simply stiffening the structure. This article poses a central question: can supplemental damping using fluid viscous dampers (AFVs) efficiently reduce wind-induced dynamic response in tall buildings, and how should these devices be distributed along the height and within the plan? It presents a design and evaluation approach based on comparative numerical modeling: a baseline building model with AFVs, considering different configurations guided by design parameters such as interstory drift. The goal is to quantify improvements in serviceability-related variables (displacements, drifts, velocities, and accelerations) and to propose practical placement criteria. Overall, the proposal seeks to translate vibration-control technology into a replicable procedure for projects in Mexico, with an emphasis on wind conditions representative of coastal regions and on measurable benefits for performance and comfort.

¿Por qué es importante este tema?

Imagina estar en el piso 25 de una torre frente al mar: no hay sismos, pero las lámparas se mecen y el café tiembla en la mesa. Ese movimiento suele ser pequeño, pero repetitivo y perceptible; basta para generar incomodidad, ansiedad o mareo en algunos ocupantes. En edificios esbeltos, el viento

Afiliaciones:

¹ Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Ingeniería Toluca, Estado de México. México. Correo: fhbanuelosg@gmail.com; adionisioa001@alumno.uaemex.mx

* Autor de correspondencia: fhbanuelosg@gmail.com



produce cargas fluctuantes asociadas a la turbulencia. Cuando esas fluctuaciones “coinciden” con las frecuencias naturales del edificio, la respuesta dinámica puede amplificarse, es decir el movimiento. El reto no es solo resistir, sino hacerlo con buen desempeño en condiciones de servicio (confort y funcionalidad). La pregunta central es: ¿cómo reducir de manera eficiente la vibración por viento sin aumentar en exceso la rigidez y el costo del edificio?. A continuación, se resume qué se hacía antes, se explica la propuesta basada en amortiguadores de fluido viscoso (AFV), se muestran aplicaciones típicas y se discute qué significa esta tecnología para usuarios, diseñadores y para el futuro de la construcción en zonas afectadas por viento de velocidades considerables.

¿Qué sabíamos antes?

Durante décadas, el control de vibraciones se abordó principalmente modificando rigidez y masa (muros, núcleos, arriostramientos), más tarde se popularizaron soluciones de control de vibraciones mediante dispositivos disipadores de energía (ver Figura 1). Los cuales se clasifican en activos, semiactivos y pasivos, sobre todo para sismo. Los disipadores pasivos son los que han cobrado mayor relevancia en virtud de no requiere una fuente de alimentación externa, como los activos y semi activo. Estos dispositivos pueden disminuir los costos tanto de los elementos estructurales como son vigas, columnas, muros entre otros, así como los elementos no estructurales como son tuberías cancelerías entre otros. Los disipadores pasivos de energía se pueden clasificar en aisladores de base y disipadores de energía, ver Figura 2. Los aisladores de base dependen mucho del tipo de suelo donde se construirá la estructura, en el caso de los suelos blandos como por ejemplo las arenas no es conveniente considerar este tipo de dispositivos. Por otra parte, los disipadores de energía pueden colocarse prácticamente en cualquier tipo de estructura e.g., edificios o puentes. Además, algunos de ellos pueden ser sustituidos después de una acción lateral e.g., un sismo o viento de consecuencias catastróficas ver Figura 3.

El cambio clave para usar este tipo de disipadores fue reconocer que, para muchos problemas de servicio, conviene “agregar disipación” en lugar de “agregar rigidez”. Uno de los dispositivos que agrega únicamente amortiguamiento son los amortiguadores de fluido viscoso (AFVs). El amortiguamiento suplementario permite reducir respuesta sin alterar drásticamente la configuración estructural. La literatura clásica sobre control estructural y amortiguamiento suplementario resume este cambio de enfoque y proporciona modelos constitutivos para estos dispositivos, así como criterios de diseño y evaluación en sistemas estructurales [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9]. Estos dispositivos generalmente se utilizan para sismo, sin embargo, también pueden utilizarse para viento, ya que también es una carga lateral que afecta a las construcciones.

Un AFV disipa energía mediante la circulación forzada de un fluido viscoso a través de orificios calibrados ver Figura 3a. Su fuerza resistente depende de la velocidad relativa:

$$F = C |\dot{u}|^\alpha \quad (1)$$

donde C es el coeficiente de amortiguamiento, $\dot{u}$ es la velocidad y α es el exponente de



Figura 1: Diferencia entre diseño estructural convencional y con disipadores de energía.

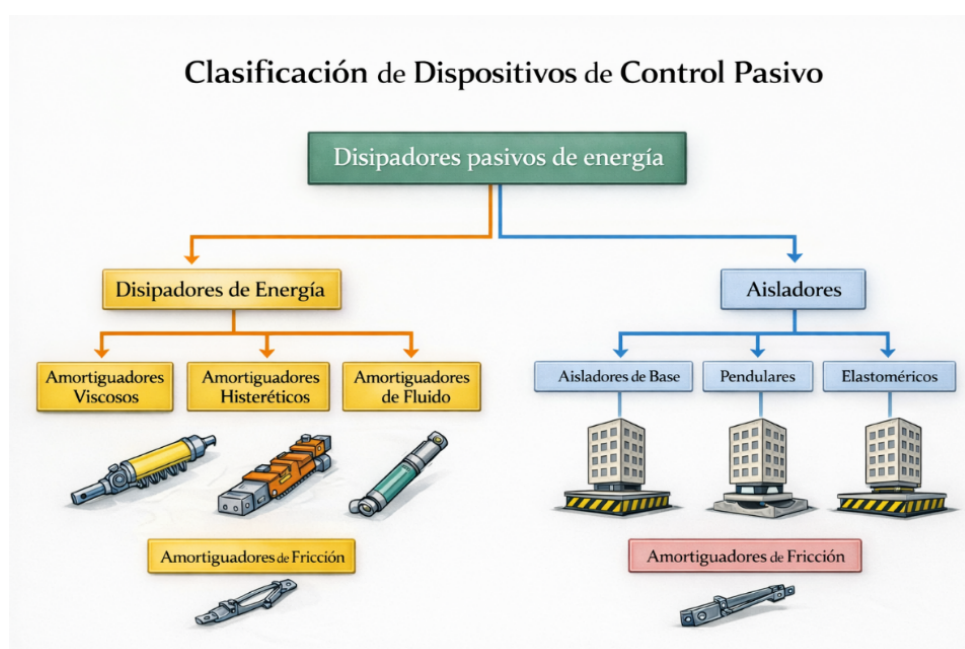


Figura 2: Sistemas pasivos de control para edificios.

velocidad que determina el grado de no linealidad del dispositivo. En la Figura 3 se muestra el comportamiento de este dispositivo.



Figura 3: Amortiguadores de fluido viscoso.

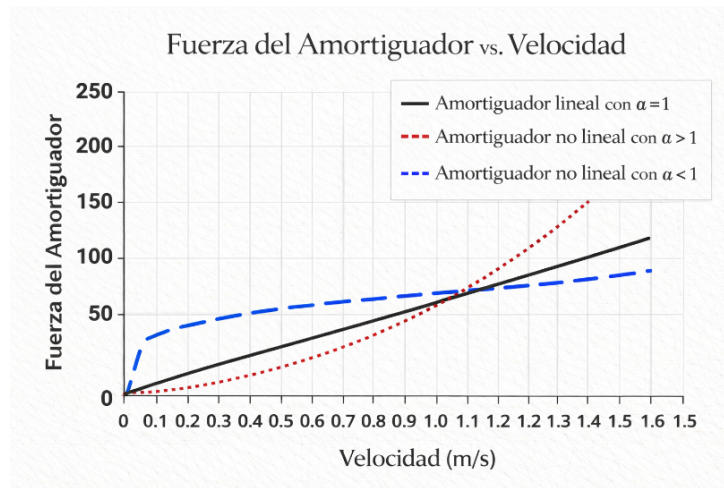


Figura 4: Grafico del comportamiento de un amortiguador.

Los elementos esenciales de un AFV son: el amortiguador (cilindro, pistón y fluido), un sistema de conexión al marco (e.g., arriostres tipo diagonal o chevron), anclajes y placas de conexión que transmiten fuerzas al sistema resistente, ver Figura 3. Típicamente este tipo de dispositivos se consideran para controlar vibraciones debidas a un sismo, no obstante, para edificios altos los sismos no impactan de forma significativa como el viento en este caso. Por tal motivo en este artículo se plantea como considerar los AFVs en estructuras que presenten “daño” por viento.

Para el diseño de este tipo de dispositivos se tienen varios procedimientos que vienen en documentos técnicos, como es el caso del ASCE 7-22 [10], para lo cual se tiene la siguiente ecuación:

$$\xi_{DPNLi} = \frac{T_i^{2-\alpha} \lambda \sum_{j=1}^{nd} C_{\alpha j} f_j^{1+\alpha} \phi_{rj,i}^{1+\alpha}}{2\pi^{3-\alpha} D_{roof}^{1-\alpha} \sum_{k=1}^{ns} m_k \phi_{k,i}^2} \quad (2)$$

En este contexto, el término ξ_{DPNL_i} expresa el incremento de amortiguamiento del mismo modo de vibración cuando se emplean amortiguadores de fluido viscoso no lineales. Ambos parámetros permiten cuantificar la capacidad de estos dispositivos para disipar energía y reducir la respuesta dinámica del edificio. El período natural de vibración asociado a cada modo se denota por T_i , mientras que el desplazamiento modal del nivel de piso k para el modo i se representa mediante $\phi_{k,i}$.

A partir de estos desplazamientos modales se define el desplazamiento relativo $\phi_{rj,i}$, que corresponde al movimiento horizontal relativo entre los extremos del amortiguador j y que gobierna directamente la fuerza que desarrolla el dispositivo. El comportamiento de cada amortiguador depende de su coeficiente de amortiguamiento. En el caso de los dispositivos lineales, este parámetro se representa por C_{Lj} , mientras que para los amortiguadores no lineales se emplea el coeficiente $C_{\alpha j}$.

La forma en que el amortiguador se integra a la estructura, es decir, su configuración geométrica o disposición dentro del marco estructural, se describe mediante la función f_j ver Figura 5. La masa asociada a cada nivel del edificio se representa por m_k , y el desplazamiento de la azotea se denota como D_{roof} , siendo este último una variable de especial interés en la evaluación del desempeño global de la estructura. En el caso de los amortiguadores no lineales, la formulación matemática incluye además la función Gamma, Γ , que surge en la expresión del amortiguamiento equivalente asociado a este tipo de dispositivos. Finalmente, el número total de amortiguadores instalados en la estructura se indica mediante n_d , mientras que n_s representa el número total de pisos del edificio. En conjunto, estos parámetros permiten describir de manera clara y comprensible cómo los amortiguadores de fluido viscoso contribuyen a mejorar el comportamiento dinámico de edificios altos sometidos a acciones dinámicas. A partir de esta ecuación se puede determinar el tamaño de los dispositivos incluso se puede modificar para colocarla en función de un parámetro de ingeniería e.g., rigidez de cada entrepiso [11].

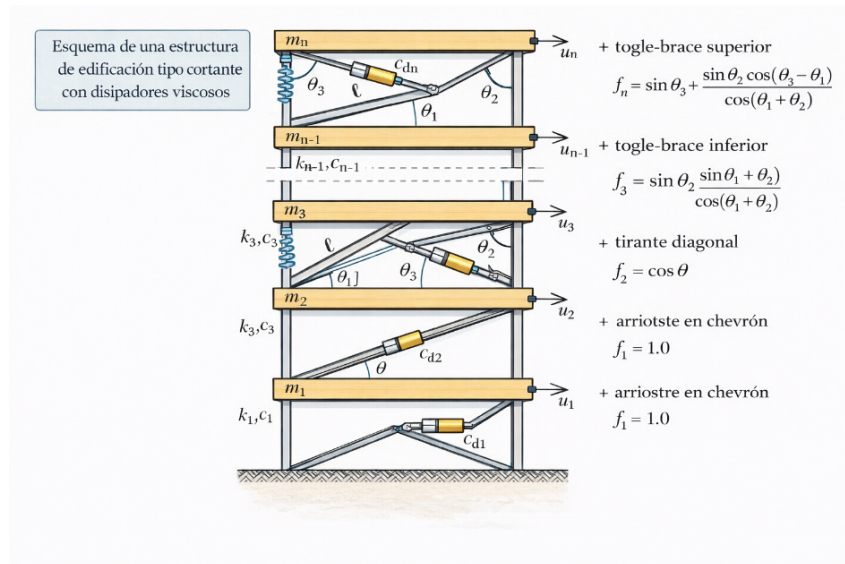


Figura 5: Configuraciones de los AFVs.

¿Cómo funciona la nueva propuesta?

Para diseñar AFVs en estructuras para acciones viento se proponen los siguientes pasos:

Paso 1. Se define el viento de diseño según normativa aplicable y se caracteriza la respuesta objetivo (servicio/confort).

Paso 2. Se modela el edificio base para identificar modos dominantes y demandas por viento.

Paso 3. Se selecciona una configuración de conexión de AFVs y una distribución preliminar por niveles.

Paso 4. Se calibran parámetros C y α para lograr un incremento de disipación objetivo. Para análisis modales, puede usarse una representación de amortiguamiento clásico equivalente cuando sea apropiado como ASCE 7-22 [10].

Paso 5. Se simulan escenarios y se comparan métricas clave (derivadas, desplazamientos, velocidades y aceleraciones).

Paso 6. Se ajusta la distribución hasta lograr la mejor relación beneficio-costos (menos dispositivos para la misma reducción).

En la Figura 6 se muestra un diagrama de flujo de los pasos de la metodología propuesta. En comparación con sobre-rigidizar, los AFVs pueden disminuir la respuesta dinámica sin incrementar significativamente fuerzas internas por rigidez adicional. En comparación con soluciones que exigen grandes masas o espacios dedicados, los AFVs suelen integrarse en marcos y fachadas con impacto arquitectónico moderado.

Casos prácticos y aplicaciones

Los AFVs se utilizan en edificios nuevos y en rehabilitación para reducir vibraciones por viento y mejorar desempeño ante sismo; también son comunes en puentes, donde ayudan a controlar desplazamientos y fuerzas durante eventos dinámicos. De forma general, estudios numéricos reportan reducciones importantes en demandas de respuesta (e.g., disminución de aceleraciones y derivadas) cuando se añade amortiguamiento suplementario y se optimiza su ubicación.

En el sector hotelero y residencial de costa, el beneficio principal suele ser el confort. En hospitales y edificios de uso crítico, además del confort, se busca continuidad operativa y protección de equipos sensibles (ver Figura 7). En infraestructura de transporte (puentes), el objetivo es limitar movimientos. Las métricas típicas incluyen reducción de aceleración pico en niveles superiores, disminución de distorsión de entrepiso y menor demanda en elementos no estructurales. El alcance exacto depende del edificio, del viento y de la estrategia de colocación; por eso es clave la comparación numérica con un modelo base.

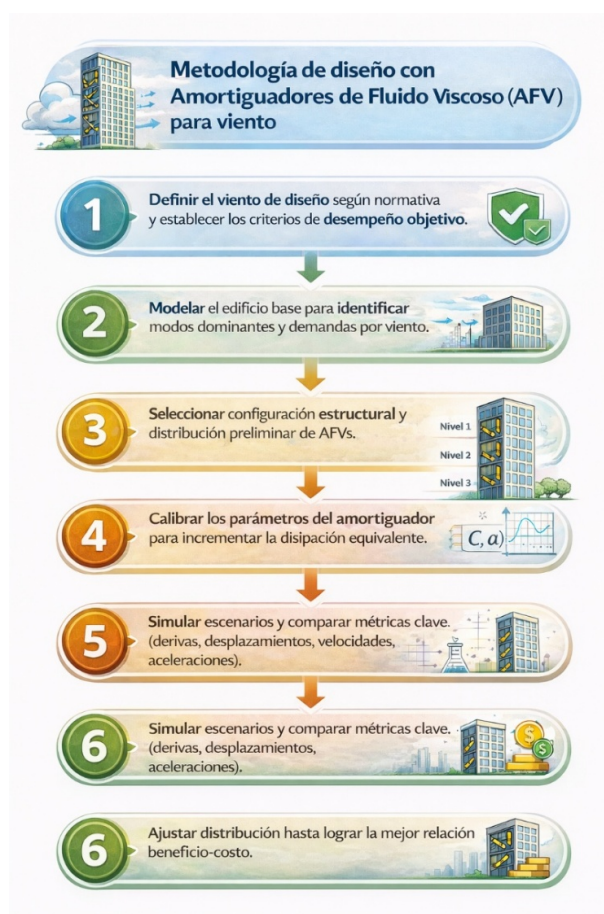


Figura 6: Diagrama de flujo de la metodología propuesta.



Figura 7: Casos prácticos donde se puede aplicar la metodología.

¿Qué significa esto para ti?

Para el usuario final, el beneficio es directo: menos movimiento perceptible, menos molestias y mayor sensación de seguridad en pisos altos durante vientos intensos. A medida que las ciudades crecen verticalmente, la exigencia de confort y funcionalidad en edificios altos se vuelve parte de la calidad de vida urbana. Tecnologías de control de vibraciones pueden facilitar desarrollos más eficientes y habitables. Para ingenieros y arquitectos, se abren oportunidades en diseño por desempeño, modelación dinámica, instrumentación, monitoreo y optimización de dispositivos. También crece la demanda de especialistas que traduzcan evidencia técnica a decisiones de proyecto. El principal desafío es evitar “soluciones de genéricas” sin análisis: los dispositivos deben diseñarse, detallarse y verificarse para el caso específico. También se debe considerar mantenimiento, inspección y trazabilidad de calidad, porque el desempeño depende de que el sistema funcione durante toda la vida útil.

El futuro que nos espera

La investigación avanza hacia dispositivos más compactos, modelos constitutivos más realistas y estrategias de colocación basadas en optimización. También crece la integración con monitoreo estructural para validar desempeño con datos reales. En el corto plazo, es probable que aumente el uso de amortiguamiento suplementario en torres de uso mixto y desarrollos costeros, sobre todo cuando el confort sea un criterio explícito de diseño. A largo plazo, la combinación de modelos digitales, sensores y dispositivos de control permitirá ajustar estrategias de operación y mantenimiento con base en el comportamiento observado. Los AFVs pueden convivir con soluciones de aislamiento, amortiguadores de masa sintonizados, sistemas semiactivos y activos. El objetivo es un diseño integral donde cada tecnología cubra un rango de demandas (servicio, sismo, eventos extremos) con eficiencia. Persisten retos: criterios de confort adaptados a contextos locales, disponibilidad de especificaciones y ensayos, estandarización de detalles constructivos y formación de personal para instalación e inspección.

Referencias

- [1] M. Palermo, S. Silvestri, L. Landi, G. Gasparini y T. Trombetti, “A "direct five-step procedure" for the preliminary seismic design of buildings with added viscous dampers”, *Engineering Structures*, vol. 173, págs. 933-950, oct. de 2018. DOI: [10.1016/j.engstruct.2018.06.103](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.103)
- [2] S. Parajuli, P. Pokhrel y R. Suwal, “A comprehensive study of viscous damper configurations and vertical damping coefficient distributions for enhanced performance in reinforced concrete structures”, *Asian J Civ Eng*, vol. 25, n.º 1, págs. 1043-1059, ene. de 2024. DOI: [10.1007/s42107-023-00831-x](https://doi.org/10.1007/s42107-023-00831-x)

-
- [3] F. H. Bañuelos-García, G. Ayala y S. Lopez, “A displacement-based seismic design procedure for buildings with fluid viscous dampers”, *Earthquakes and Structures*, vol. 18, n.º 5, págs. 609-623, mayo de 2020. DOI: [10.12989/EAS.2020.18.5.609](https://doi.org/10.12989/EAS.2020.18.5.609)
- [4] S. Silvestri, G. Gasparini y T. Trombetti, “A Five-Step Procedure for the Dimensioning of Viscous Dampers to Be Inserted in Building Structures”, *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 14, n.º 3, págs. 417-447, mar. de 2010. DOI: [10.1080/13632460903093891](https://doi.org/10.1080/13632460903093891)
- [5] P. P. Diotallevi, L. Landi y A. Dellavalle, “A Methodology for the Direct Assessment of the Damping Ratio of Structures Equipped with Nonlinear Viscous Dampers”, *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 16, n.º 3, págs. 350-373, abr. de 2012. DOI: [10.1080/13632469.2011.618521](https://doi.org/10.1080/13632469.2011.618521)
- [6] F. Bañuelos-García y G. Ayala, “A Novel Displacement-Based Seismic Design Procedure Considering Non-Linear Fluid Viscous Dampers and Damage Control”, *Journal of Earthquake Engineering*, págs. 1-22, feb. de 2025. DOI: [10.1080/13632469.2025.2464609](https://doi.org/10.1080/13632469.2025.2464609)
- [7] Y. Zhou, X. Lu, D. Weng y R. Zhang, “A practical design method for reinforced concrete structures with viscous dampers”, *Engineering Structures*, vol. 39, págs. 187-198, jun. de 2012. DOI: [10.1016/j.engstruct.2012.02.014](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.02.014)
- [8] H. Ataei y K. Kalbasi Anaraki, “A proposed structural design method considering fluid viscous damper degradations”, *Struct Design Tall Spec Build*, vol. 27, n.º 15, e1512, oct. de 2018. DOI: [10.1002/tal.1512](https://doi.org/10.1002/tal.1512)
- [9] L. Landi, O. Fabbri y P. P. Diotallevi, “A two-step direct method for estimating the seismic response of nonlinear structures equipped with nonlinear viscous dampers”, *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, vol. 43, n.º 11, págs. 1641-1659, sep. de 2014. DOI: [10.1002/eqe.2415](https://doi.org/10.1002/eqe.2415)
- [10] *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*, ASCE 7-22, ASCE, Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2021. DOI: [10.1061/9780784415788](https://doi.org/10.1061/9780784415788)
- [11] F. Bañuelos-García, J. De La Colina, D. De-León-Escobedo y M. Escamilla-García, “Evaluation of arrangements and distributions of fluid viscous dampers on seismic performance for Valley of Mexico”, *Earthquakes and Structures*, vol. 29, n.º 6, págs. 411-425, dic. de 2025. DOI: [10.12989/EAS.2025.29.6.411](https://doi.org/10.12989/EAS.2025.29.6.411)

¿Cómo medir la variabilidad de la frecuencia cardíaca en una mamá en constante movimiento?

How to Measure Heart Rate Variability in a Mom in Constant Motion?

Gonzalez-Lopez, D. I.^{1*} , Martinez-Mendez, R.¹, Rodriguez-Arce, J.¹, Zuñiga-Avilés, L. A.¹

Historial del artículo

Recibido: 15-mar-2025

Aceptado: 05-may-2025

Disponible en línea: 30-ago-2025

Palabras clave

ES: Variabilidad de la frecuencia cardíaca, fotoplethysmografía, sensores portátiles, movimiento corporal, periodo postparto

EN: Heart rate variability, photoplethysmography, wearable sensors, body movement, postpartum period

RESUMEN

A lo largo del día, el ritmo de nuestro corazón cambia continuamente, adaptándose a nuestras emociones, acciones y entorno. Sin embargo, medir esta variabilidad en movimiento constituye un reto importante, ya que los sensores más usados actualmente basados en luz (fotoplethysmografía) son muy sensibles a los movimientos del cuerpo, generando datos erróneos. Este problema es crítico para cualquier aplicación, pero en este artículo nos enfocaremos en la medición de estrés en mujeres en periodo postparto, quienes enfrentan altos niveles de ansiedad y estrés, pero a quienes, la demanda de cuidados del bebé les impide estar quietas para usar equipos médicos tradicionales. Este artículo propone el diseño de un sistema portátil experimental que permitiría comparar simultáneamente cuatro ubicaciones estratégicas: lóbulo de la oreja, frente, dedo y pecho. La metodología propuesta utiliza acelerómetros y un electrocardiograma de referencia para identificar qué zona anatómica es menos propensa al “ruido” provocado por actividades maternas típicas. La principal aportación es una estrategia para descubrir qué parte del cuerpo ofrece la señal más “limpia” mientras la madre realiza tareas como cargar o arrullar a su bebé, permitiendo descartar mecánicamente el ruido. Estos hallazgos podrían sentar las bases para desarrollar futuros dispositivos discretos que vigilen el bienestar materno en tiempo real sin interrumpir la labor de crianza.

ABSTRACT

Throughout the day, our heart rhythm changes constantly, adapting to our emotions, actions, and surroundings. However, measuring this variability while moving is a major challenge. The popular light-based sensors used today (photoplethysmography) are very sensitive to body movement, often creating erroneous data. This is a critical issue, especially for measuring stress in postpartum women. New mothers often face high levels of anxiety but cannot stay still enough to use traditional medical equipment because of the constant demands of baby care. This article proposes the design of an experimental wearable system that simultaneously compares four strategic body sites: the earlobe, forehead, finger, and chest. The proposed methodology uses accelerometers and a reference electrocardiogram to identify which body part is least affected by the “noise” caused by typical maternal activities. The main contribution is a strategy to discover which spot offers the “cleanest” signal while a mother performs tasks like holding or rocking her baby, helping to filter out movement noise. These findings could lay the groundwork for future discreet devices that monitor maternal well-being in real-time without interrupting parenting tasks.

Afiliaciones:

¹ Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Ingeniería Toluca, Estado de México. México. Correo: digonzalezl001@uaemex.mx; rmartinezme@uaemex.mx; jrodrigueza@uaemex.mx; lazunigaa@uaemex.mx

* Autor de correspondencia: digonzalezl001@uaemex.mx



¿Por qué es importante este tema?

¿Alguna vez has sentido que el corazón se te acelera sin haber corrido un maratón? Esa variación en el tiempo entre latido y latido es como un código secreto que nuestro cuerpo utiliza para decirnos cómo está nuestra salud física y mental. Para una mujer que acaba de dar a luz, descifrar este código es vital. El periodo postparto es una verdadera montaña rusa: el cuerpo se está recuperando, las hormonas cambian y el sueño escasea. En México, la situación es seria; estudios recientes señalan que casi el 40 % de las mujeres en esta etapa reportan síntomas de depresión o ansiedad [1]. Detectar este estrés a tiempo podría cambiar vidas, pero aquí nos topamos con un obstáculo técnico: las mamás no son estatuas.

La tecnología actual que usamos en relojes y pulseras inteligentes funciona con luz (una técnica llamada fotoplethismografía o PPG) [2]. Es fantástica porque es cómoda y no duele, pero tiene un gran talón de Aquiles: el movimiento [3]. Cuando una madre camina, mece a su bebé o realiza tareas domésticas, el sensor se mueve y la señal se deforma con “ruido”, haciendo que el dispositivo confunda el movimiento del brazo con los latidos del corazón [3], [4]. Entonces, si las manos de una madre están ocupadas cuidando al recién nacido, ¿realmente es la muñeca el mejor lugar para medir su estrés?

Este es el dilema que abordamos aquí. La pregunta central que buscamos resolver no es solo técnica, sino práctica: ¿En qué parte del cuerpo deberíamos colocar un sensor para que detecte claramente los latidos del corazón de una mamá activa, sin que el movimiento arruine la medición? A lo largo de este artículo, te contaremos cómo diseñamos un sistema experimental capaz de medir en cuatro lugares al mismo tiempo (frente, oído, dedo y pecho) para descubrir cuál de ellos es el “campeón” de la estabilidad frente al ajetreo de la maternidad.

¿Qué sabíamos antes?

Si te pido que imagines una medición médica del corazón, probablemente visualizarás una escena de hospital: una persona acostada en una camilla, inmóvil, con cables pegados al pecho y una máquina haciendo un “bip” rítmico, ver Figura 1. Ese es el electrocardiograma (ECG), y durante décadas ha sido el “estándar de oro” de la medicina. Funciona midiendo la electricidad que genera el corazón, y aunque es increíblemente preciso, tiene un gran problema para la vida diaria: los cables son estorbosos y requieren que te quedes quieto.

Sin embargo, la historia dio un giro fascinante hace casi un siglo. En la década de 1930, investigadores pioneros como Molitor y Kniazuk descubrieron que no era necesario “tocar” el corazón con electrodos para escucharlo; bastaba con “observar” los efectos de los latidos en las arterias [2]. Se dieron cuenta de que, al hacer pasar luz a través de la piel (como en la oreja de un conejo o un dedo humano), la cantidad de luz que pasaba cambiaba con cada latido. Había nacido la fotoplethismografía (PPG). Aunque el nombre suena complicado, el principio es sencillo: la sangre absorbe luz; cuando el corazón bombea, llega más sangre y pasa menos luz, ver Figura 2.



Figura 1: Obtención de las señales eléctricas del corazón en un estudio de ECG habitual.

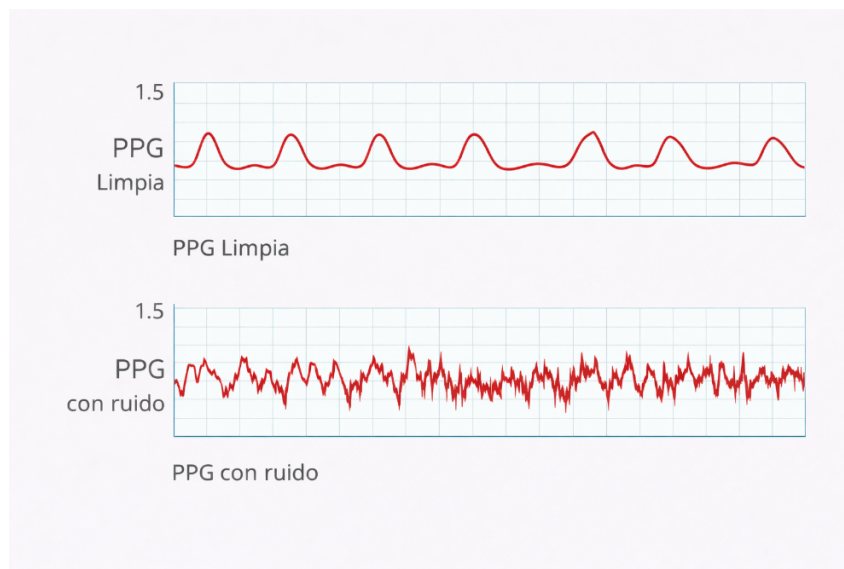


Figura 2: Fotopleletismografía: Midiendo el pulso del corazón con luz.

La era de los “wearables” y su talón de Aquiles

Este descubrimiento permaneció en el ámbito clínico (en los oxímetros de dedo) hasta que la tecnología moderna lo miniaturizó. Hoy, millones de personas llevan sensores PPG en sus relojes inteligentes (smartwatches) usando luces verdes o rojas para monitorear su salud. Parecía la solución perfecta: portátil, sin dolor y fácil de usar.

Pero pronto descubrimos una limitación crítica. Estos sensores ópticos son extremadamente sensibles a lo que los ingenieros llamamos “artefactos de movimiento” [3]. Imagina que tratas de escuchar un susurro en medio de un concierto de rock; eso es lo que le pasa al sensor cuando te mueves. Investigaciones recientes han demostrado que acciones tan simples como caminar o mover el brazo crean una “señal fantasma” que puede ser diez veces más fuerte que la señal real del corazón. El sensor se confunde y no sabe qué es latido y qué es movimiento, ver Figura 3.



Figura 3: Señal PPG Ideal y Señal PPG Afectada por Ruido.

El rompecabezas de la ubicación

Hasta ahora, la ciencia ha intentado resolver esto mediante algoritmos matemáticos complejos o filtros digitales, pero con éxito limitado si el movimiento es intenso o impredecible [3]. Además, surge otro debate: ¿es la mano realmente el mejor lugar para cualquier actividad? Estudios comparativos recientes han demostrado que, aunque el dedo ofrece una señal muy fuerte, es la parte del cuerpo que más movemos [5]. Otros sitios, como el lóbulo de la oreja o la frente, podrían ofrecer señales más estables porque la cabeza se mueve menos que las extremidades, pero la señal allí suele ser más débil o tener formas de onda distintas que dificultan el análisis [4], [5].

Aquí es donde nos encontramos con un punto de inflexión. Sabemos que la tecnología actual falla cuando una madre carga a su bebé o realiza labores domésticas, porque sus movimientos no son los de un corredor en una caminadora; son movimientos asimétricos y constantes. Por lo tanto, no basta con mejorar el software; necesitamos repensar el diseño físico de la medición. ¿Y si en lugar de confiar en un solo punto (como la muñeca), “interrogamos” a varias partes del cuerpo simultáneamente para ver cuál miente?, ver Figura 4.

¿Cómo funciona la nueva propuesta?

Para resolver el dilema de medir el estrés sin interrumpir a mamá, hemos diseñado un sistema que no se conforma con una sola opinión. Nuestra propuesta tecnológica se basa en dos pilares: la redundancia estratégica (medir en muchos lados) y la verificación cruzada (medir el movimiento).

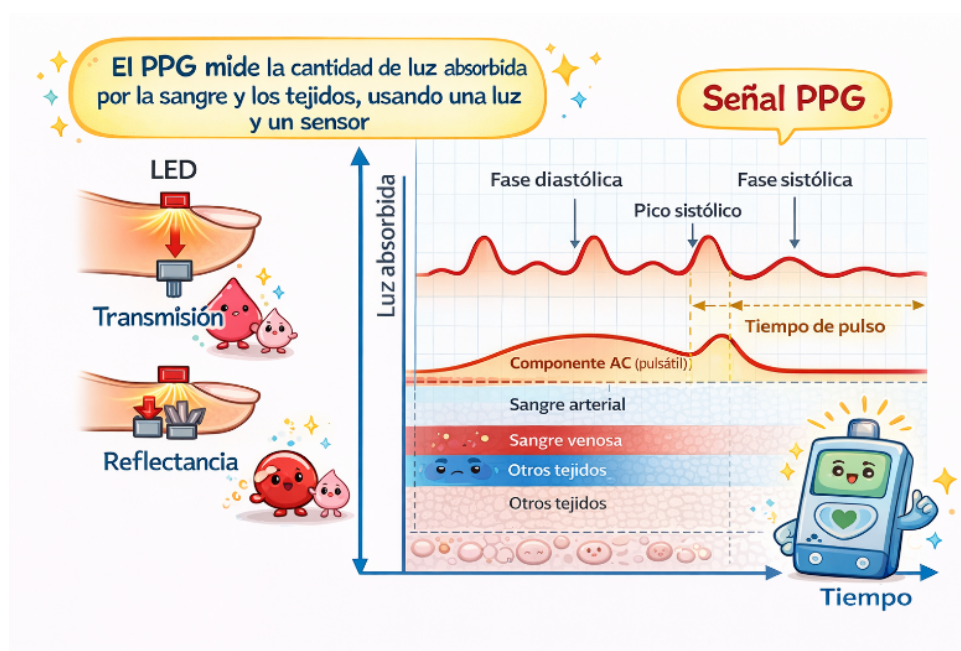


Figura 4: Buscando el mejor lugar para medir el pulso.

El principio de la “linterna” (Fotopleletismografía)

El núcleo del sistema es la fotopleletismografía (PPG), la misma tecnología que usan los relojes inteligentes. El principio es fascinante por su sencillez: imagina que pones una linterna potente contra tu dedo en una habitación oscura. Verás que tu dedo brilla en rojo y, si te fijas bien, ese brillo parpadea ligeramente. Eso ocurre porque cada vez que el corazón bombea (sístole), llega más sangre a los tejidos y absorbe más luz; cuando el corazón se relaja (diástole), la sangre retrocede y pasa más luz. Nuestros sensores hacen exactamente esto: emiten luz (generalmente verde o infrarroja) y miden cuánta rebota, convirtiendo esos cambios de luz en una onda digital que dibuja el ritmo del corazón [2].

Componentes: Un equipo de cuatro “observadores”

A diferencia de los dispositivos comerciales que apuestan todo a la muñeca o a los dedos, nuestro prototipo experimental coloca sensores en cuatro puntos anatómicos simultáneamente. La lógica es simple: si una parte del cuerpo se mueve, quizás otra esté quieta.

El dedo: Es el estándar clásico porque tiene mucha circulación y da una señal muy fuerte, pero es el primero en fallar si la madre usa las manos [4].

La frente: Al estar irrigada por la arteria supraorbitaria, ofrece una señal robusta y la cabeza suele moverse menos que las extremidades, aunque los gestos faciales pueden interferir [4].

El lóbulo de la oreja: Es una zona discreta y, según estudios recientes, ofrece una señal comparable a la del dedo, pero con menos artefactos por movimiento corporal general [4].

El pecho: Al estar cerca del corazón y en el centro del cuerpo (tronco), sufre menos aceleraciones

bruscas que los brazos, aunque la respiración puede afectar la lectura [4].

El detector de mentiras (Acelerómetros)

Aquí está el truco de ingeniería: cada sensor de luz va acompañado de un acelerómetro, un dispositivo electrónico idéntico al que controla en un teléfono celular cuándo girar la pantalla. Este sensor funciona como un “chismoso”: su único trabajo es reportar qué tanto se está moviendo esa parte específica del cuerpo. El sistema funciona paso a paso así:

1. Adquisición: Los sensores de luz captan el pulso en los cuatro puntos simultáneamente.
2. Interrogatorio: El sistema consulta a los acelerómetros. Por ejemplo, si la mamá está meciendo al bebé, el acelerómetro del dedo gritará “¡Aquí hay mucho movimiento!”, mientras que el del pecho podría reportar calma.
3. Validación: El algoritmo descarta las señales de las zonas ruidosas y prioriza las zonas estables.
4. El Juez de la Verdad: Como este es un prototipo para validar la tecnología, necesitamos saber quién tiene la razón. Por eso, el sistema incluye un cable de seguridad: El electrocardiograma (ECG). El ECG mide la electricidad directa del corazón y no se deja engañar tan fácil por el movimiento. Nos sirve como el “patrón de oro” o juez. Al final, compararemos las señales de luz (PPG) con el juez (ECG) para ver qué ubicación (frente, oreja, dedo o pecho) dijo la verdad más veces mientras la madre realizaba sus actividades.

Casos prácticos y aplicaciones

Más allá del gimnasio: La vida real de una madre

Seguramente has visto (o usado) relojes inteligentes que miden tus pasos y tu pulso mientras corres. Estas son las aplicaciones comerciales actuales más exitosas. Dispositivos como el Apple Watch o Fitbit han hecho que la fotopleletismografía (PPG) sea algo cotidiano para deportistas y entusiastas del fitness [3]. Sin embargo, estos aparatos están diseñados para asumir movimientos rítmicos y repetitivos, como trotar. ¿Pero qué pasa cuando el movimiento es caótico, impredecible y delicado, como el de una madre cuidando a un recién nacido? Ahí es donde la tecnología comercial suele rendirse y mostrar datos erróneos o vacíos.

El “casting” de sensores: un experimento de selección

Para resolver esto, no proponemos llenar a la madre de cables, sino realizar un estudio exhaustivo para encontrar el lugar perfecto. Nuestro prototipo experimental funciona como un “juez” en una audición. Colocamos sensores en cuatro candidatos simultáneamente: frente, oreja, dedo y pecho, y sometemos estos puntos a las pruebas de fuego del día a día materno (ver Figura 5):

- La Lactancia: Aunque la madre parece estar quieta, su postura cambia, y si usa las manos

para sostener al bebé, un reloj de muñeca podría perder la señal por la tensión muscular o la posición del brazo. - El arrullo: El movimiento de mecer a un bebé genera una frecuencia rítmica que puede confundirse con el latido cardíaco. - La caminata con carga: Caminar sosteniendo peso (el bebé) cambia el centro de gravedad y el impacto en el cuerpo, generando vibraciones distintas a una caminata libre [6].



Figura 5: Actividades propias del periodo postparto consideradas en el análisis de señales fisiológicas en condiciones de movimiento.

Beneficios cuantificables: En busca del “Campeón de la Estabilidad”

El objetivo de este desarrollo tecnológico es obtener un dato crucial que hoy desconocemos: la cobertura. En ingeniería biomédica, la cobertura es el porcentaje de tiempo que un sensor nos dice la verdad en lugar de darnos error. Estudios previos en laboratorio sugieren que el dedo tiene una señal muy fuerte pero muy sensible al movimiento, mientras que la oreja o la frente podrían ser más estables [4]. Sin embargo, nadie ha comparado esto en tareas de maternidad. Nuestra meta es comparar los cuatro sitios y decir: “Para una madre activa, el sensor X es el único que mantiene una señal confiable el 95 % del tiempo”. Esto permitirá descartar los lugares problemáticos y diseñar, en el futuro, un dispositivo que use un solo sensor ubicado en el sitio ganador, garantizando comodidad y precisión sin estorbar en la crianza.

¿Qué significa esto para ti?

Imagina un futuro donde tu dispositivo de salud no sea un reloj estorboso que te lastima al cargar a tu bebé, sino quizás un pequeño “arete” inteligente o un parche discreto en el pecho, diseñado científicamente para funcionar justo donde tu cuerpo emite la mejor señal. Este estudio es el primer paso para crear tecnología que se adapte a la mamá, y no que la mamá tenga que adaptarse a la tecnología.

Al identificar el sitio anatómico óptimo, podremos dejar de depender de dispositivos genéricos

deportivos y pasar a herramientas de salud mental materna efectivas. Esto facilitaría la detección temprana de episodios de ansiedad o estrés postparto, permitiendo que el dispositivo avise a la madre cuándo necesite tomar un respiro, basándose en datos reales y no en errores por movimiento.

El futuro que nos espera

La carrera tecnológica actual no se trata solo de hacer sensores más potentes, sino más inteligentes. Hoy en día, la investigación se centra en la “limpieza digital”. Ya no nos conformamos con capturar la señal; ahora estamos enseñando a los dispositivos a distinguir, mediante algoritmos avanzados, qué es un latido y qué es el movimiento de un brazo al cambiar un pañal. Estudios recientes, como los revisados por Seok y colaboradores [3], muestran que el futuro inmediato está en combinar la señal de luz (PPG) con datos de movimiento (acelerómetros) para reconstruir la señal perdida, casi como si el dispositivo “adivinara” con precisión científica lo que ocurrió durante el movimiento.

A muy corto plazo, una vez que nuestro estudio y otros similares determinen cuál es el “lugar ganador” (frente, oído, dedo o pecho) para una madre activa, veremos una simplificación radical del hardware. Dejaremos de usar aparatos experimentales llenos de cables para pasar a dispositivos minimalistas ubicados en un solo punto. Es muy probable que veamos el auge de los “hearables” (dispositivos en el oído) o parches inteligentes invisibles, dado que el lóbulo de la oreja ha mostrado ser un candidato prometedor por su estabilidad frente al movimiento del resto del cuerpo (ver Figura 6).



Figura 6: Ubicaciones Anatómicas Alternativas para la Medición de Señales PPG.

A largo plazo, la meta es la invisibilidad. Imaginamos una tecnología que cuide a la mamá sin que ella tenga que pensar en ello. Al integrar estos sensores validados en accesorios cotidianos (como unos aretes o una diadema), podremos monitorear la variabilidad cardíaca 24/7. Esto

permitiría detectar patrones de estrés crónico o riesgo de depresión postparto antes de que se conviertan en una crisis, enviando alertas suaves al teléfono o directamente al médico, tal como sugieren las necesidades clínicas actuales.

Este futuro no depende solo de la fotopletismografía. Estamos viendo una convergencia fascinante con la Inteligencia Artificial (IA). Mientras el sensor mide la sangre, una IA podría aprender las rutinas específicas de cada madre, adaptándose a sus patrones de sueño y actividad para no dar falsas alarmas. Además, el Internet de las Cosas (IoT) permitirá que estos datos viajen en tiempo real a la nube, lo que creará una red de seguridad digital alrededor de la maternidad.

Sin embargo, no todo es color de rosa. Aún enfrentamos desafíos importantes. El principal obstáculo sigue siendo la eficiencia energética: un dispositivo que monitorea constantemente consume mucha batería, y no podemos pedirle a una mamá ocupada que cargue su sensor cada cuatro horas. Además, debemos garantizar que los materiales sean hipoalergénicos y cómodos para pieles sensibles o en contacto con el bebé. Superar la barrera del “ruido por movimiento” es solo el primer paso; el siguiente será lograr que la tecnología sea tan humana y resiliente como las madres que busca proteger.

Referencias

- [1] B. V. Suárez-Rico et al., “Prevalence of Depression, Anxiety, and Perceived Stress in Postpartum Mexican Women during the COVID-19 Lockdown”, *IJERPH*, vol. 18, pág. 9, abr. de 2021. DOI: [10.3390/ijerph18094627](https://doi.org/10.3390/ijerph18094627)
- [2] J. Allen, “Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement”, *Physiol. Meas.*, vol. 28, n.º 3, R01, mar. de 2007. DOI: [10.1088/0967-3334/28/3/R01](https://doi.org/10.1088/0967-3334/28/3/R01)
- [3] D. Seok, S. Lee, M. Kim, J. Cho y C. Kim, “Motion Artifact Removal Techniques for Wearable EEG and PPG Sensor Systems”, *Front. Electron.*, vol. 2, mayo de 2021. DOI: [10.3389/felec.2021.685513](https://doi.org/10.3389/felec.2021.685513)
- [4] P. Armañac-Julián et al., “Reliability of pulse photoplethysmography sensors: Coverage using different setups and body locations”, *Front. Electron.*, vol. 3, pág. 906 324, sep. de 2022. DOI: [10.3389/felec.2022.906324](https://doi.org/10.3389/felec.2022.906324)
- [5] V. Hartmann, H. Liu, F. Chen, Q. Qiu, S. Hughes y D. Zheng, “Quantitative Comparison of Photoplethysmographic Waveform Characteristics: Effect of Measurement Site”, *Front. Physiol.*, vol. 10, pág. 198, mar. de 2019. DOI: [10.3389/fphys.2019.00198](https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00198)
- [6] S. Nakić Radoš, M. Brekalo y M. Matijaš, “Measuring stress after childbirth: development and validation of the Maternal Postpartum Stress Scale”, *J Reprod Infant Psychol*, págs. 1-13, jun. de 2021. DOI: [10.1080/02646838.2021.1940897](https://doi.org/10.1080/02646838.2021.1940897)