

DIGITAL CIENCIA@UAQRO

Universidad Autónoma de Querétaro
Secretaría de Investigación, Innovación y Posgrado



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO

DIRECTORIO

Dra. Silvia Lorena Amaya Llano
Rectora
Dra. Oliva Solís Hernández
Secretaría Académica
Dr. Manuel Toledano Ayala
Secretario de Investigación, Innovación y Posgrado
Lic. Diana Rodríguez Sánchez
Directora del Fondo Editorial Universitario

COMITÉ EDITORIAL

Dra. Azucena de la Concepción Ochoa Cervantes
Editora en jefe
Lic. María Verónica Muñoz Velázquez
Coordinadora editorial

Ciencias Físico Matemáticas
Dra. Janet Ledesma García
Universidad Autónoma de Querétaro, México

Ciencias de la Conducta y Educación
Dr. Martín Mora Martínez
Universidad de Guadalajara, México
Dra. Graciela Cordero Arroyo
Universidad Autónoma de Baja California, México
Dra. Addy Rodríguez Betanzo
Universidad Autónoma de Quintana Roo, México

Ciencias Políticas y Sociales
Dra. Adriana Reynaga
Universidad Nacional Autónoma de México, México
Dra. Virginia Guadalupe Reyes de la Cruz
Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca, México

Ciencias Químico Biológicas
Dr. Fernando Chiang Cabrera
Universidad Nacional Autónoma de México, México
Dr. Juan Campos Guillén
Universidad Autónoma de Querétaro, México
Dra. Rosalía Reynoso Camacho
Universidad Autónoma de Querétaro, México

Ciencias Jurídicas
Dr. Juan Ricardo Jiménez Gómez
Universidad Autónoma de Querétaro, México
Dr. Gerardo Porfirio Hernández Aguilar
Universidad Autónoma de Querétaro, México

Ciencias de la Salud
Dr. Carlos Arámburo de la Hoz
Universidad Nacional Autónoma de México, México
Dra. Margarita Teresa de Jesús García Gasca
Universidad Autónoma de Querétaro, México
Dra. María Peña Rangel
Universidad Nacional Autónoma de México, México
Dr. Elhadi Yahia Kazuz
Universidad Autónoma de Querétaro, México

Agropecuarias
Dra. Tercia C. Reis de Souza
Universidad Autónoma de Querétaro, México
Dra. Rosalía Ocampo Velázquez
Universidad Autónoma de Querétaro, México

COMITÉ CIENTÍFICO INTERNACIONAL

Dra. Paula Ascorra Costa
Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile
Dr. Domingo Mayor Paredes
Universidad de Murcia, España
Dra. Xus Martín
Universidad de Barcelona, España
Dr. Hugo Becker
Universidad Libre, Colombia

EQUIPO TÉCNICO EDITORIAL

Lic. Andrea Hernández Álvarez
Correctora de estilo
Lic. Alejandro Zamorano Gómez
Diseñador editorial
Amir Balam
Fotografía de portada

El diseño de esta revista se financió con recursos de la Universidad Autónoma de Querétaro. Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación. Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial del contenido e imágenes de la publicación sin plena autorización de la Universidad Autónoma de Querétaro. Comité Editorial Revista Digital Ciencia @UAQRO.

Digital Ciencia@UAQRO, Vol. 18, No. 1, enero-junio 2025, es una publicación semestral editada por la Universidad Autónoma de Querétaro, a través de la Secretaría de Investigación, Innovación y Posgrado, Cerro de las Campanas, s/n, Col. Las Campanas, C.P. 76010, Querétaro, Qro., Tel. (442) 1921200 Ext. 3244, <https://revistas.uaq.mx/index.php/ciencia>, ciencia@uaq.mx Editora responsable: Azucena de la Concepción Ochoa Cervantes. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2015-120318073400-203, ISSN: 2395-8847, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número, Secretaría de Investigación, Innovación y Posgrado, María Verónica Muñoz Velázquez, Cerro de las Campanas, s/n, Col. Las Campanas, C.P. 76010, Querétaro, Qro. Fecha de última modificación: 30 de enero de 2025.

ÍNDICE

5 **Presentación editorial**

Dra. Azucena de la Concepción Ochoa Cervantes

Sección temática:

Temas o problemas relacionados
con las ciencias naturales y exactas

9 **Ácidos orgánicos y su importancia en el desarrollo sostenible**

*Organic acids and their importance
in sustainable development*

Dr. Fernando Israel Gómez-Castro, Jocelyne Villagómez Ibarra,
Lic. Oswaldo Isaac Martínez-Cortés, Dr. Zeferino, Gamiño-Arroyo,
Dr. Salvador Hernández, Ing. Juan Cristóbal García-García
y Dr. Guillermo Manuel González-Guerra

35 **Co-producción de bioetanol y bioproductos en procesos intensificados: hacia la factibilidad económica de la bioindustria**

*Co-production of bioethanol and bioproducts
in intensified processes: towards the economic
feasibility of the bioindustry*

Mtra. Yulissa Mercedes Espinoza-Vázquez, Dr. Fernando Israel
Gómez-Castro, Dra. Araceli Guadalupe Romero-Izquierdo
y Dr. Eduardo Sánchez-Ramírez

55 **Harinas instantáneas: ingrediente versátil para una alimentación rápida y nutritiva** *Instant flours: versatile ingredient for a quick and nutritious meal*

Dra. Teresita Arredondo-Ochoa, Dra. Amira Calvo-López,
Dr. Eduardo Morales-Sánchez y Dra. Marcela Gaytán-Martínez

67 **Metaanálisis de estrategias de los institutos nacionales de metrología y su relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible**

Meta-analysis of national metrology institutes' strategies and their relationship with the United Nations Sustainable Development Goals

Mtro. César Alonso Gutiérrez Rojas

81 **Guía para la elaboración del apartado metodológico de protocolos de investigación clínicos, biomédicos y epidemiológicos**

Guideline for the preparation of the methodological section of clinical, biomedical and epidemiological research protocols

Dr. Adrián Enrique Hernández-Muñoz, Sara Nahián Martínez-Mosso, Sujey Ugalde-Barrón, María Pia Mendoza-Fonseca, Luis Marco Aguilar-Ramos, Jovana Álvarez-Alvarado, Mtro. Isidro Amadeo Gutiérrez-Álvarez y Dr. Rodrigo Miguel González-Sánchez

99 **Presencia de ansiedad y depresión en personas con diabetes tipo 2 y esclerosis múltiple en Querétaro, México**

Anxiety and depression in persons with type 2 diabetes mellitus and multiple sclerosis in Querétaro, México

Bruno Eduardo Méndez Cruz, Mtra. Ana Laura Hernández Ledesma, Dr. Juan Carlos Solís Sáinz, Mtra. Norma Angélica Rivera Villaseñor, Mtra. Lilia Susana Gallardo Vidal y Dra. Adriana Jheny Rodríguez-Méndez

Presentación editorial

La investigación científica respecto a temas de sostenibilidad en diversos sectores se ha vuelto una responsabilidad imperativa que tiene como fin dar respuesta a las necesidades del mundo actual, el cual exige soluciones inmediatas y contundentes. En este número, la revista Digital Ciencia@UAQRO presenta diversos artículos que demuestran la importancia de la transversalidad de temáticas, como son la innovación, la salud, la sustentabilidad y la economía circular, los cuales, en conjunto, destacan la relevancia de la implementación de soluciones a los desafíos globales.

El primer estudio, que tiene por nombre “Ácidos orgánicos y su importancia en el desarrollo sostenible”, muestra cómo éstas sustancias orgánicas han ganado importancia por sus diversas aplicaciones en la industria, los autores destacan el potencial que tienen en la sustitución de ácidos inorgánicos, resaltando sus ventajas para la industria y el ambiente. Una de las aplicaciones más atractiva es la recuperación de metales de interés mediante del uso de biomasa renovable. Lo anterior posiciona a este proceso como una alternativa más sostenible, pues representa un menor impacto para el ambiente en un marco de economía circular que favorece la hidrometalurgia.

El segundo artículo expone que es posible innovar los procesos de obtención de combustibles a partir de la revalorización de residuos que tienen el potencial de ser usados como biomasa, por su alto contenido en lignocelulosa, para su aplicación en un esquema tecnológico de biorrefinería. Se remarca la importancia de este proceso para la obtención de bioetanol y otros biocompuestos de importancia industrial, como el furfural y el ácido láctico. Aunque la rentabilidad de este bioproceso aún presenta algunas limitantes, los autores justifican que la intensificación de este es una opción viable para la producción sostenible de biocombustibles que puedan sustituir a los combustibles fósiles desde la perspectiva de una industria económicamente rentable y ambientalmente amigable.

En la investigación titulada “Harinas instantáneas: ingrediente versátil para una alimentación rápida y nutritiva”, se describe cómo la tecnología ha ayudado en la evolución de los procesos para la obtención de ingredientes que puedan satisfacer las necesidades y demandas alimenticias actuales. En este sentido,

se define a las harinas como un elemento de gran importancia para la nutrición humana y que ha favorecido el desarrollo de alimentos de la dieta base. En la revisión se resalta la evolución de este ingrediente desde su origen, transformación, así como sus aplicaciones actuales y futuras. Finalmente, los autores destacan su importancia en términos de funcionalidad y nutrición, lo que demuestra el papel que ejerce en la seguridad alimentaria y en el desarrollo de la industria de alimentos.

Por otro lado, se presenta la investigación que tienen por nombre “Metaanálisis de estrategias de los institutos nacionales de metrología y su relación con los objetivos de desarrollo sostenible”, en donde se utiliza la herramienta estadística para analizar el contenido de datos de diversas investigaciones de la literatura, lo que permitió evaluar cómo la dirección estratégica de los Institutos Nacionales de Metrología se alinea al cumplimiento de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. Los resultados revelaron que existe una alineación total de estas instituciones con los ODS, y también permitieron identificar áreas de oportunidad para fortalecer su contribución en la reducción de la pobreza y la desigualdad, siendo la educación una de los principales medios para lograrlo.

En el artículo “Guía para la elaboración del apartado metodológico de protocolos de investigación clínicos, biomédicos y epidemiológicos” los autores proponen y describen las etapas de un apartado metodológico efectivo para el desarrollo de protocolos de investigación clínica, biomédica y epidemiológica al instaurar seis etapas clave: establecer hipótesis y objetivos, diseñar la investigación, calcular la muestra, definir variables, prevenir sesgos y errores, y describir el plan de análisis estadístico. Los autores argumentan que la implementación de la guía metodológica propuesta proporciona un marco de referencia que promueve la aceptación de los protocolos y garantiza la calidad, así como la reproducibilidad, de los estudios en estas áreas de la salud.

Por último, el artículo “Presencia de ansiedad y depresión en personas con diabetes tipo 2 y esclerosis múltiple en Querétaro, México” presenta un interesante estudio que evaluó la sintomatología depresiva en pacientes con estas dos condiciones médicas. Los resultados revelaron una mayor frecuencia de síntomas de depresión, y marcadores bioquímicos mayormente alterados en pacientes con Esclerosis Múltiple, respecto a los pacientes con Diabetes tipo 2. Los autores mencionan que este estudio sustenta la necesidad de abordar de forma integral las

necesidades psicológicas y nutrimentales en estos pacientes para mejorar su calidad de vida.

Es evidente que la investigación científica desempeña un papel fundamental en la identificación y solución de los desafíos globales; la interdisciplinariedad es clave para abordar los problemas complejos que involucran múltiples dimensiones; por lo tanto, la colaboración entre diferentes actores, como investigadores, gobiernos y empresas, es esencial para impulsar la transición hacia un futuro más sostenible. Esperamos que los artículos que se presentan en este número sean una base útil para el área científica y tecnológica.

Dra. Azucena de la Concepción Ochoa Cervantes

**SECCIÓN TEMÁTICA:
TEMAS O PROBLEMAS RELACIONADOS
CON LAS CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS**

Ácidos orgánicos y su importancia en el desarrollo sostenible

Organic acids and their importance in sustainable development

Fernando Israel Gómez-Castro*

Jocelyne Villagómez Ibarra

Oswaldo Isaac Martínez-Cortés

Zeferino Gamiño-Arroyo

Salvador Hernández

Guillermo Manuel González-Guerra

Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México

Juan Cristóbal García-García

Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería, Guanajuato, México

* fgomez@ugto.mx

Fecha de recepción: 11 de diciembre del 2023

Fecha de aceptación: 21 de octubre del 2024

Resumen

En años recientes, los ácidos orgánicos han tomado gran importancia para diversas aplicaciones industriales. Se han realizado distintos estudios donde se propone el uso de este tipo de sustancias como reemplazo de los ácidos inorgánicos, tales como el ácido sulfúrico, entre otros. Los ácidos orgánicos pueden obtenerse a partir de biomasa; de esta manera, su producción se asocia a un impacto ambiental relativamente bajo y con el potencial de contribuir a la implementación de esquemas de economía circular. Una de las aplicaciones en las que los ácidos orgánicos pueden reemplazar a los inorgánicos es en la recuperación de metales valiosos a partir de residuos, incrementando sus potenciales beneficios al medio ambiente. En este trabajo se presentan las características de los ácidos orgánicos. Se discuten las estrategias para su obtención a partir de biomasa, así como sus potenciales aplicaciones en hidrometalurgia.

Palabras claves: ácidos orgánicos, biomasa, fermentación, hidrometalurgia



Abstract

In the last years, organic acids have taken importance on diverse industrial applications. Various studies have taken place, where the use of such substances is proposed as replace of inorganic acids, as sulfuric acid, among others. Organic acids can be obtained from biomass. Thus, its production is associated with a relatively low environmental impact, with potential to contribute to the implementation of circular economy schemes. Among the applications on which organic acids can replace to the inorganic ones, the recovery of valuable metals from residues can be mentioned, increasing the potential benefits of such acids to the environment. In this work, the characteristics of the organic acids are presented. The strategies required to produce them from biomass are discussed, and their potential applications in hydrometallurgy are described.

Keywords: organics acids, biomass, fermentation, hydro-metallurgy

Introducción

Los ácidos inorgánicos, también conocidos como ácidos minerales, son sustancias obtenidas a partir de compuestos inorgánicos, entre los más comunes se encuentran el ácido sulfúrico, el ácido clorhídrico y el ácido nítrico (Speight, 2018). El ácido sulfúrico es uno de los compuestos químicos más empleados, contando a su vez con una amplia experiencia en su producción a nivel industrial. Se ha reportado que la primera planta comercial de producción de ácido sulfúrico inició operaciones en el siglo XVI (Kutney, 2007). La demanda por este material a nivel mundial en 2021 fue de 259.62 millones de toneladas métricas (Statista, 2023a). Asimismo, se ha reportado que el ácido sulfúrico comprende un 36-40% del mercado global de ácidos (Predence Research, 2022). Otros ácidos inorgánicos tienen también un importante mercado a nivel mundial, tal como el ácido nítrico, con una demanda global en 2021 de aproximadamente 70 millones de toneladas (Lim y col., 2021). Sin embargo, una característica de los ácidos minerales comunes es su alta corrosividad. Adicionalmente, durante su manejo pueden generarse vapores peligrosos (Xiao y col., 2020), así como corrientes residuales con alta acidez (Rodríguez-Domínguez y Kirsch, 2006). Por otra parte, muchas de las materias primas empleadas en la producción de los ácidos inorgánicos provienen de minerales no renovables, cuya extracción tiene un impacto ambiental negativo, asociado principalmente a la contaminación y/o acidificación del agua, así como el consumo de recursos no renovables, la degradación del suelo y la

contaminación atmosférica, entre otros (Gallardo Martínez y col., 2013). Debido a estos factores negativos, en los últimos años ha crecido el interés por la obtención de materiales con menor impacto ambiental que puedan reemplazar a los ácidos inorgánicos en diversas aplicaciones.

Los ácidos orgánicos pueden producirse a partir de procesos fermentativos. Estas rutas de producción implican, en principio, un menor impacto ambiental en comparación con el asociado a la obtención de ácidos inorgánicos. Lo anterior debido a que se producen a partir de materiales renovables, y no se generan productos como óxidos de azufre o de nitrógeno, que contribuyen al efecto invernadero. Por otra parte, el uso de biomasa residual contribuye a la implementación de esquemas de economía circular, reintegrando un material actualmente considerado como desecho a la cadena productiva y dándole un segundo uso en la obtención de productos de valor agregado (Oloffson y Börjesson, 2018), como los ácidos orgánicos. El mercado de los ácidos orgánicos a nivel mundial es menor que el de los ácidos inorgánicos. Por ejemplo, el mercado del ácido acético en 2021 fue de 16.7 millones de toneladas métricas (Statista, 2023b), mientras que el del ácido láctico fue de 1.39 millones de toneladas métricas (Statista, 2023c).

Se han reportado diversas aplicaciones relevantes para los ácidos orgánicos. Por ejemplo, el ácido cítrico es reconocido como un compuesto con amplia aplicación debido a su versatilidad y biocompatibilidad, con usos en industrias como la farmacéutica y la alimenticia, así como en la producción de detergentes y cosméticos (Soccol y col., 2006; Lambros y col., 2022). Por otra parte, el ácido láctico tiene aplicaciones en la conservación de alimentos, y es materia prima para la obtención de plásticos y fibras, entre otros derivados (Datta y Henry, 2006). El ácido acético es empleado como saborizante y conservador en alimentos (Vidra y Nemeth, 2018); también es materia prima para la obtención de productos como el vinil acetato, el cual es la base para la resina polivinil acetato (Omanov y col., 2020). Una aplicación que ha tomado relevancia en los últimos años implica el uso de los ácidos orgánicos como agentes lixiviantes en procesos hidrometalúrgicos. En la extracción de metales valiosos de jales mineros, así como la recuperación de metales de residuos eléctricos y electrónicos, regularmente se emplea ácido sulfúrico como un agente lixivante con un alta eficiente de recuperación, no obstante, dada la agresividad de este material, así como las implicaciones medioambientales de su producción, en años recientes se ha estudiado el poten-

cial de los ácidos orgánicos para emplearse como reemplazo del ácido sulfúrico en estas aplicaciones. Esto permitiría llevar a cabo el proceso de recuperación de materiales a partir de residuos empleando agentes que pueden obtenerse a partir de residuos orgánicos, lo que contribuye a un esquema sostenible, enmarcado en el concepto de economía circular. Dado lo anterior, en este artículo se describirán a los ácidos orgánicos más comunes y su obtención a partir de biomasa. Asimismo, se establecerá el potencial de este tipo de materiales para su aplicación en procesos hidrometalúrgicos para la recuperación de metales valiosos.

Ácidos orgánicos

Los ácidos orgánicos son materiales que contienen en su estructura uno o más grupos carboxilo (Papagianni, 2011). En otras palabras, sus moléculas incluyen átomos de carbono unidos por átomos de oxígeno con enlaces dobles. Lo anterior les otorga características fisicoquímicas a los ácidos orgánicos, como la solubilidad en agua y su carácter de ácido débil (Scapinello y col., 1998).

A pesar de que muchos compuestos cumplen con estas características, existe solo un número limitado que han presentado un creciente interés comercial, lo que ha llevado al estudio de rutas de producción biotecnológica como una solución integral al paulatino incremento en la demanda por parte de la industria química. Estos análisis se han centrado tanto en el desarrollo de estrategias eficientes de producción, como en el aprovechamiento de residuos o subproductos industriales (Ripoll, 2011).

Este tipo de ácidos están presentes principalmente en alimentos tales como frutas y vegetales, siendo responsables de varias de sus propiedades organolépticas (Flores y col., 2012). Sin embargo, algunos ácidos orgánicos también pueden encontrarse en otras fuentes, como el suero de leche (García-Mujica y Benavides-Cedeño, 2020). Los más comunes son el ácido acético, el ácido cítrico, el ácido oxálico, entre otros (Gurtler y Mai, 2014).

Respecto al ácido acético, este es uno de los ácidos orgánicos con mayor demanda tanto en la industria química como en la alimentaria, siendo sus principales aplicaciones la producción de acetato de vinilo monómero, empleado en la fabricación de pinturas, adhesivos y papel, y la producción de ácido terftálico purificado, precursor del poliéster PET. Además, es el ingrediente clave en el vinagre (ICIS., s.f.). Se prevé que el mercado

global de ácido acético crezca considerablemente al año 2027, llegando a alcanzar los 12,471 mdd, siendo el ácido acético puro uno de los más importantes solventes en la industria electrónica (Grand View Research, 2023). Entre las formas de obtención del ácido acético se distinguen dos tipos de rutas:

i) Las vías sintéticas

Los tres principales métodos convencionales de producción de ácido acético sintético son la oxidación de acetaldehído (Agreda y Zoeller, 1992), la oxidación de hidrocarburos en fase líquida (Weissermel y Arpe, 2003) y la carbonilación de metanol (Thomas y Süß-Fink, 2003). A pesar de que en la actualidad los tres métodos mencionados son los más utilizados debido al amplio conocimiento en torno a estas rutas de síntesis (Jmker y col., 2014), los requerimientos de mejoras en términos de impacto ambiental han impulsado la búsqueda de procesos alternativos.

ii) La fermentación bacteriana

La obtención de ácido acético a través de la fermentación de azúcares es el método más tradicional, aunque menos utilizado actualmente dadas las ventajas que presentan las vías sintéticas desde un punto de vista económico, del posible aprovechamiento de materia prima y de la potencial eficiencia en sus procesos de síntesis (González-Guerra y col., 2024). El proceso fermentativo se basa en el uso de diferentes cepas de microorganismos (bacterias u hongos) que potencializan el proceso de conversión hacia ácidos orgánicos. En la Tabla 1 se muestran los microorganismos más utilizados en los últimos años, así como su hábitat y forma de aislamiento para su uso. Se observa que, adicional a la generación de ácido láctico, un microorganismo puede dar origen a la formación de otros ácidos orgánicos.

Como se puede observar en la Tabla 1, existe una gran variedad de microorganismos que pueden utilizarse en rutas fermentativas para la producción de ácidos orgánicos, siendo el cítrico y el láctico los más comunes. Asimismo, la incubación de estos oscila entre uno a siete días y no ocupan temperaturas mayores a 30 °C, lo que puede significar una ventaja en términos de requerimientos energéticos, al no necesitar un incremento considerable a partir de la temperatura ambiente.

Tabla 1

Microorganismos utilizados en fermentación bacteriana.

Microorganismo	Hábitat	Aislamiento	Ácido orgánico que puede producirse a través del microorganismo	Referencia
<i>Escherichia coli</i>	Se encuentra en el intestino de humanos y animales. Ambientes contaminados. Alimentos.	Incubación a 37 °C por 24 h en agar MacConkey (peptona, sales biliares y lactosa) o Eosin Metileno (peptona, eosina y lactosa). Con un pH de crecimiento óptimo de 7.0, puede crecer tanto en presencia como en ausencia de oxígeno.	Ácido láctico, ácido acético y ácido succínico.	Liu y col. (2013). Thakker y col. (2013).
<i>Corynebacterium glutamicum</i>	Suelo y ambientes vegetales.	Incubación a 30 °C por 48 h en medios que contengan sustratos de almidón o glucosa. Con un pH óptimo de crecimiento entre 6.5 y 7.5, en condiciones aeróbicas.	Ácido glutámico, ácido cítrico y ácido succínico	Litsanov y col. (2013)
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Ambientes ricos en azúcares y en algunos ambientes industriales para la fabricación de alcoholes.	Incubación a 30 °C por 48 h en agar YPD (levadura, peptona y dextrosa) o Sabouraud (peptonas y dextrosa). Con un pH de crecimiento óptimo entre 4.5 y 6.5, puede crecer tanto en presencia como en ausencia de oxígeno.	Ácido cítrico y el ácido láctico.	Curran y col. (2013) Toivari y col. (2012)
<i>Aspergillus niger</i>	Se encuentra comúnmente en el suelo, materia orgánica en descomposición y en ambientes húmedos	Incubación a 30 °C por 7 días en agar patata dextrosa o Agar Sabouraud (peptonas y dextrosa). Con un pH óptimo de crecimiento entre 4.5 y 6.5, en condiciones aeróbicas.	Ácido cítrico.	Blumhoff y col. (2013) Kuivanen y col. (2012)

<i>Aspergillus oryzae</i>	Se encuentra comúnmente en suelos y en materia orgánica en descomposición. También se encuentra en alimentos fermentados como el miso o la salsa de soja.	Incubación a 30 °C por 7 días en agar patata dextrosa o Agar Sabouraud (peptonas y dextrosa). Con un pH óptimo de crecimiento entre 5.5 y 6.5, en condiciones aeróbicas.	Ácido cítrico y ácido láctico.	Brown y col. (2013)
<i>Rhizopus oryzae</i>	Se encuentra comúnmente en suelos y en materia orgánica en descomposición. También se encuentra en alimentos fermentados a base de soja.	Incubación a 30 °C por 5 días en agar patata dextrosa o Agar Sabouraud (peptonas y dextrosa). Con un pH óptimo de crecimiento entre 5.0 y 6.5, en condiciones aeróbicas.	Ácido cítrico.	Zhang y col. (2012)
<i>Pichia kudriavzevii</i>	Se encuentra en suelos, ambientes vegetales y en la superficie de frutas. Es común en ambientes con alta disponibilidad de azúcares.	Incubación a 30 °C por 72 h en agar YPD (levadura, peptona y dextrosa) o Sabouraud (peptonas y dextrosa). Con un pH óptimo de crecimiento entre 4.5 y 6.0, en condiciones aeróbicas.	Ácido láctico y ácido cítrico.	Toivari y col. (2013)
<i>Kluyveromyces lactis</i>	Se encuentra en suelos y en la superficie de plantas, donde puede acceder a azúcares presentes en la materia orgánica.	Incubación a 30 °C por 72 h en agar YPD (levadura, peptona y dextrosa) o Sabouraud (peptonas y dextrosa). Con un pH óptimo de crecimiento entre 5.0 y 6.5, puede crecer tanto en presencia de oxígeno como en ausencia.	Ácido láctico y ácido cítrico.	Nygaard y col. (2011)

Los caldos de la fermentación en producción en escala laboratorio están formados mayoritariamente por agua destilada o desionizada con una pequeña cantidad del ácido. En los procesos a gran escala se utiliza agua corriente, aunque recientes estudios proponen el uso de agua marina (Chen y Liu, 2021). En cualquiera de los casos, es necesario diseñar procesos que consigan concentrar y purificar esas disoluciones. Una ventaja que presenta la biosíntesis es la posibilidad de obtener los productos deseados a partir de fuentes renovables con contenido de azúcares, celulosa y/o hemicelulosa. Dentro de estos materiales es posible mencionar residuos tales como cáscaras,

bagazos, pajas, pulpas, residuos sólidos urbanos orgánicos, entre otros (Caltzontzin-Rabell y col., 2022; Espinoza-Vázquez y col., 2023)

Otro ácido orgánico de interés es el ácido cítrico (ácido 2-hidroxipropanoic), el cual se considera de origen natural, sin embargo, también se puede sintetizar vía ruta metabólica. Es parte de casi todos los tejidos animales y vegetales, se presenta en forma de ácido en frutas como el limón, mandarina, lima, toronja, naranja, piña, ciruela, guisantes, melocotón, así como en los huesos, músculos y sangre de animales. Adicional a sus ya mencionadas aplicaciones en las industrias farmacéuticas y de alimentos (Behera, 2020), el ácido cítrico puede emplearse en la recuperación de metales, como zinc y níquel, a partir de lodos (Wang y col. 2015), o metales como litio y cobalto a partir de residuos de baterías (Punt y col., 2021).

La síntesis en el laboratorio del ácido cítrico se lleva a cabo a partir de bacterias u hongos en una fuente de nitrógeno, carbono y glucosa. Se aisló por primera vez a partir del zumo de limón mezclado con cal, disolviendo el precipitado con ácido sulfúrico (Sánchez Toro y col., 2004). Las técnicas más comunes para su obtención son la fermentación sumergida y de superficie (Vandenberghe y col., 1999), y la fermentación en estado sólido (Mendoza y Kulich, 2004). En el caso de la fermentación sumergida y de superficie, las variables a tomar en cuenta durante los procesos de conversión son: temperatura, pH, concentración de sustrato, agitación y el tiempo que dura la fermentación. Referente a la fermentación en estado sólido; la humedad, la temperatura, el pH, la concentración de sustrato, la aeración y el tiempo de fermentación son las variables más importantes por tomar en consideración. Para su comercialización, se presenta como un ácido anhídrido o monohidratado, se espera una producción anual de 1.5 millones de toneladas de las cuales el 70% se destina a la industria de alimentos y bebidas como acidificante o antioxidante para preservar o mejorar los sabores y aromas de jugos de frutas, helados y mermeladas. 20% se usa en la industria farmacéutica como antioxidante para conservar las vitaminas, efervescentes, correctores de pH. El 10% restante se utiliza en la industria química como un agente de formación de espuma para el ablandamiento y el tratamiento de los textiles (Guadalupe y col., 2021).

Finalmente, el ácido oxálico es el más simple de los ácidos dicarboxílicos alifáticos, se trata de un ácido orgánico saturado. Éste se presenta como un sólido incoloro (cristales higroscó-

picos o polvo blanco) con un sabor amargo, sus niveles de reacción son altos con oxidantes fuertes, forma oxalatos al reaccionar con bases, es muy ácido y venenoso, es soluble en agua y en alcohol y se cristaliza fácilmente en el agua (Aliano y Ellis, 2009).

El ácido oxálico es un producto con un gran interés industrial, tanto por su uso directo como decapante, curtiente, en la limpieza de radiadores, etcétera, como por ser un intermedio importante para la síntesis de numerosos compuestos que pueden aplicarse en la industria. Los procesos denominados “*síntesis química*” para la obtención del ácido oxálico presentan una serie de inconvenientes relacionados a su eficiencia e impacto ambiental, ya que se generan desechos como el dióxido de nitrógeno, ácido nítrico residual, nitratos, óxidos de carbono y aguas residuales. Este método tradicional se basa en la oxidación con ácido nítrico de las melazas de la remolacha azucarera, lo que da lugar a un rendimiento inferior al 70% y la producción de subproductos con impacto medioambiental, consecuencia del desprendimiento de gran cantidad de óxidos de nitrógeno y la generación de agua con una elevada demanda química de oxígeno (Ochoa Gómez, 2003). En la Tabla 2, se presenta una comparativa de ventajas y desventajas en el empleo de ácidos orgánicos respecto a los inorgánicos en diversas aplicaciones industriales (Theron y Lues, 2010a, 2010b).

Tabla 2

Ventajas y desventajas de los ácidos orgánicos respecto al uso de ácidos inorgánicos (Theron y Lues, 2010a, 2010b).

Ventajas	Desventajas
Biocompatibilidad: son ácidos menos tóxicos, más seguros en industrias como la alimentaria.	Costos de producción: los procesos fermentativos por los que se obtienen pueden ser más costosos que la obtención industrial de ácidos inorgánicos.
Sostenibilidad: se pueden obtener a partir de residuos agroalimentarios, lo que dirige los esfuerzos a la implementación de esquemas de economía circular.	Estabilidad: los ácidos orgánicos pueden ser menos estables químicamente a temperaturas altas y condiciones extremas de pH.
Menor corrosividad: los ácidos orgánicos son menos corrosivos, lo que reduce riesgo de daños en equipamiento industrial.	Variabilidad en el rendimiento: puede variar dependiendo de la fuente y del proceso de producción

Impacto ambiental: los subproductos pueden degradarse fácilmente a través de procesos biológicos.	Escalabilidad: la producción de ácidos orgánicos a partir de procesos biotecnológicos puede enfrentar desafíos de escalabilidad, lo que dificulta su implementación a gran escala en comparación con los métodos tradicionales de producción de ácidos inorgánicos.
---	---

A pesar de que el uso de ácidos orgánicos como alternativa a los ácidos inorgánicos en aplicaciones industriales ofrece ventajas significativas en términos de sostenibilidad y seguridad, también presenta limitaciones en términos de económicos derivado a que la mayoría de sus procesos se encuentran todavía en investigación, lo que dificulta desplazar a las tecnologías existentes por ácidos inorgánicos. En el caso de procesos que ya se encuentran establecidos, como es el caso del utilizado para producción de ácido cítrico, la etapa de purificación presenta áreas de oportunidad desde el punto de vista ambiental. Debido a esto, es necesaria la búsqueda de estrategias para la mejora de la competitividad económica de las rutas de producción de ácidos orgánicos.

Como se ha mencionado hasta el momento, los ácidos orgánicos (cítrico, láctico, oxálico y acético) se pueden obtener a partir de diferentes métodos fermentativos. Para su producción es posible utilizar fuentes de carbono como materia prima; igualmente, se requiere un ambiente rico en nitrógeno, dependiendo del microorganismo ausencia o presencia de oxígeno, entre otras. Asimismo, se emplean diferentes cepas de bacterias y hongos, y los métodos de síntesis tienen gran influencia sobre el rendimiento en la obtención de estos productos, sin embargo, debido a la relevancia que tienen los ácidos orgánicos en los diferentes sectores de la industria, es necesario proponer nuevas rutas de conversión, así como enfocar y direccionar los métodos de síntesis a partir de materia prima de bajo costo y renovable. Los actualmente considerados como residuos o subproductos agroalimentarios (e.g. residuos de frutas y vegetales como cáscaras de plátano, naranja, granada, piña, zanahoria, brócoli, entre otros) son una alternativa interesante para esta aplicación, debido a su gran contenido de azúcares y a la gran generación de este tipo de residuos. A continuación, se aborda la importancia de utilizar la biomasa para la producción de ácidos orgánicos.

Producción de ácidos orgánicos a partir de biomasa

Procesos de conversión de biomasa En la Tabla 3 se muestran las 4 rutas para llevar a cabo la conversión de biomasa en bioproductos.

Tabla 3

Tipos de rutas de conversión de biomasa. *Elaboración propia.

Tipo de conversión	Descripción	Aplicaciones	Referencia
Anaerobia	Este proceso utiliza microorganismos para descomponer la biomasa en ausencia de oxígeno, produciendo biogás (principalmente metano) y digestato.	Sus aplicaciones son en la conversión de residuos de alimentos, estiércol y residuos agrícolas en biogás.	He y col. (2024)
Aerobia	Se emplean microorganismos en presencia de oxígeno que convierten la biomasa en productos como ácidos orgánicos tales como el ácido cítrico y el ácido láctico.	Sus aplicaciones utilizan los residuos de frutas y vegetales para la producción de ácido orgánicos.	Sreenath y col. (2021)
Hidrólisis enzimática	En este proceso se emplean enzimas específicas con la capacidad de descomponer la celulosa y hemicelulosa en azúcares fermentables.	La conversión de paja, bagazo y otros residuos lignocelulósicos en azúcares para fermentación son algunos de los ejemplos de sus aplicaciones.	Rathore y Singh (2021)
Pirólisis y gasificación	Estos procesos térmicos se basan en la descomposición de la biomasa a altas temperaturas en ausencia (pirólisis) o con cantidades limitadas de oxígeno (gasificación), produciendo biocombustibles líquidos y gaseosos.	Las aplicaciones de esta categoría son la conversión de residuos leñosos y agrícolas en biocombustibles.	Bridgwater (2012)

*Tipos de biomasa a partir
de los cuales se pueden
obtener ácidos orgánicos*

Una de las grandes ventajas que presentan los ácidos orgánicos es su potencial de obtención a partir de biomasa proveniente de residuos agroalimentarios, como frutas, vegetales o cosechas. Estos productos pueden ser de gran utilidad para diversas aplicaciones en la industria alimentaria, la industria química y petroquímica; así como para industrias en el tratamiento de aguas y la recuperación de elementos de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Esto muestra el potencial de los ácidos orgánicos derivados de residuos agroalimentarios y como pueden contribuir a la sostenibilidad y la reducción de residuos que se generan en los diferentes sectores, tanto industrial como urbano, al tiempo que ofrecen beneficios en una amplia variedad de aplicaciones. La demanda de productos sostenibles y la creciente preocupación por el medio ambiente están impulsando aún más la investigación y el desarrollo en dicho campo (Gómez Castro y col., 2022).

Como ya se mencionó anteriormente, la biomasa representa una gran ventaja para distintos sectores y favorece la optimización de posibles rutas de procesamiento y deshecho de los residuos. Entre las ventajas se incluyen la implementación de esquemas sostenibles de manejo de residuos, debido a la reducción de la carga medioambiental asociada a la disposición de estos: como una alternativa a su acumulación en rellenos sanitarios o su incineración, los residuos pueden tener un segundo uso. Otra ventaja importante es la reducción de la dependencia de combustibles fósiles derivados del petróleo a largo plazo. En general, la utilización de residuos agroalimentarios para la producción de ácidos orgánicos no sólo contribuye a la reducción de los mismos y a la sostenibilidad medioambiental, sino que también ofrece beneficios económicos y se ajusta a la creciente demanda de productos sostenibles. Dicho planteamiento es beneficioso tanto para el medio ambiente como para la economía. Diversos autores han realizado un extenso estudio para destacar la importancia de encontrar nuevas rutas de procesamiento; tal es el caso de Liu y col. (2023), quienes realizaron un estudio de valoración de los residuos agroalimentarios para la producción de bioproductos. Asimismo, Liu (2023), centra su investigación en las rutas de conversión y la caracterización detallada de los residuos agroalimentarios. Entre los ácidos que más destacan por su obtención a partir de biomasa se encuentran el ácido cítrico, el ácido acético y el ácido oxálico (Yan y col., 2023).

De entre los residuos agroalimentarios que recientemente se han reportado destacan los residuos de cáscara de gra-

nada (Roukas y Kotzekidou, 2020), a partir de los cuales pueden obtenerse diferentes subproductos como tintes naturales, extractos antioxidantes, productos para el cuidado personal y/o biocombustibles. Este proceso de obtención no requiere condiciones asépticas para llevar a cabo la conversión y se facilita el proceso mediante la fermentación de estado sólido, lo cual reduce el costo de producción.

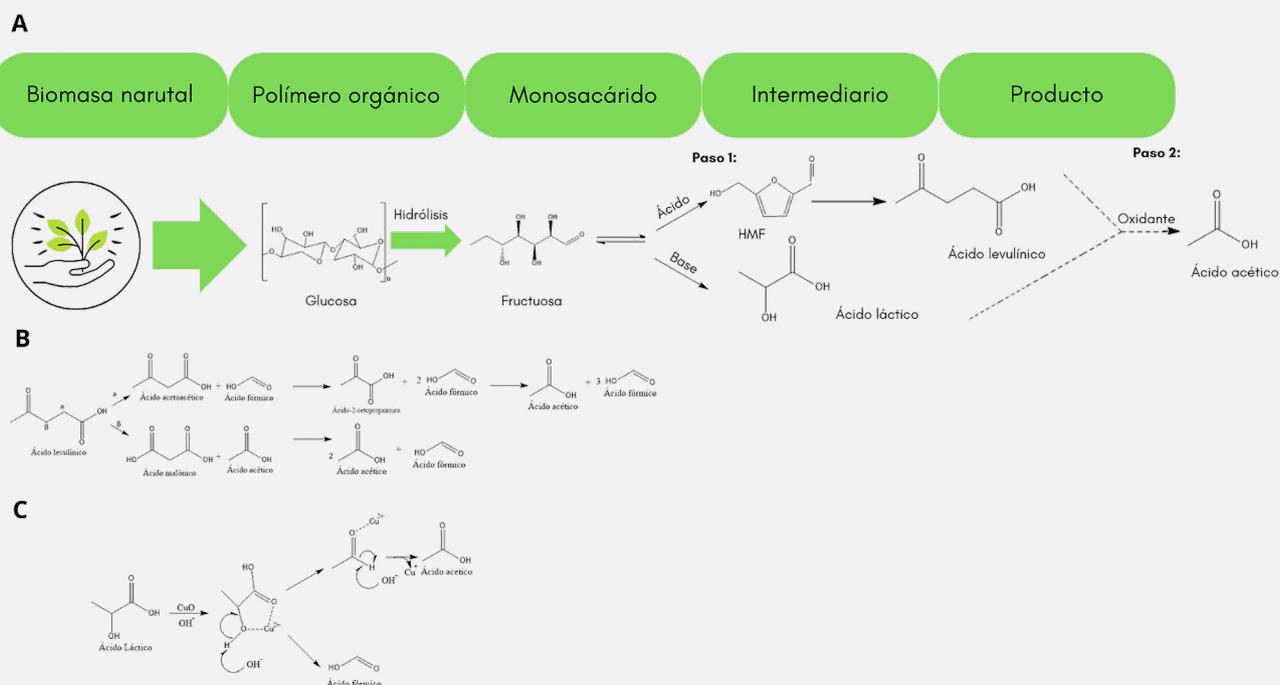
Descripción general de las rutas de procesamiento para la obtención de ácidos orgánicos

De entre las rutas de procesamiento más viables, la producción de ácidos orgánicos se ha favorecido, con buenos rendimientos y un bajo costo de producción, de la fermentación de residuos de biomasa, como los mencionados anteriormente. La producción de ácido cítrico o del ácido acético se ha obtenido principalmente con *Aspergillus niger* usando una ruta fermentativa que involucra un proceso de secado, neutralización y fermentación mediante el hongo mencionado (Villagómez-Ibarra y col., 2023). Sin embargo, la fermentación en estado sólido ofrece más ventajas, como la eficacia y la similitud que presenta el desarrollo de microorganismos con un entorno natural de crecimiento (Roukas y Kotzekidou, 2020). Esto se debe a que se aprovechan los residuos sólidos generados. Además, requiere menos agua que la fermentación líquida, facilita un mejor control de la temperatura y la humedad, y genera subproductos de valor agregado.

Yan y col. (2023) realizaron un extenso análisis de las rutas de procesamiento y la viabilidad que existe para la conversión de biomasa a ácidos orgánicos; a modo de ejemplo de la relevancia que tienen estas síntesis, la Figura 1 presenta la ruta para la obtención del ácido acético. En la serie de reacciones A se parte de la biomasa, posteriormente se da un proceso de hidrólisis y de neutralización a la glucosa y fructosa que componen a los diferentes residuos de fruta y vegetales. De esta manera, se obtienen ácido láctico y ácido levulínico, este último al pasar por un proceso de oxidación da lugar al ácido acético. En la secuencia de reacciones B se observa que a partir del ácido levulínico formado en la ruta A, se puede obtener el ácido acético y el ácido fórmico. Finalmente, para la ruta de reacciones C, el ácido láctico obtenido en la ruta A también puede dar lugar a la producción de ácido fórmico y ácido acético posterior a un tratamiento con catalizadores metálicos.

Figura 1

Rutas de reacciones para la conversión de biomasa a ácidos orgánicos (Yan y col., 2023).



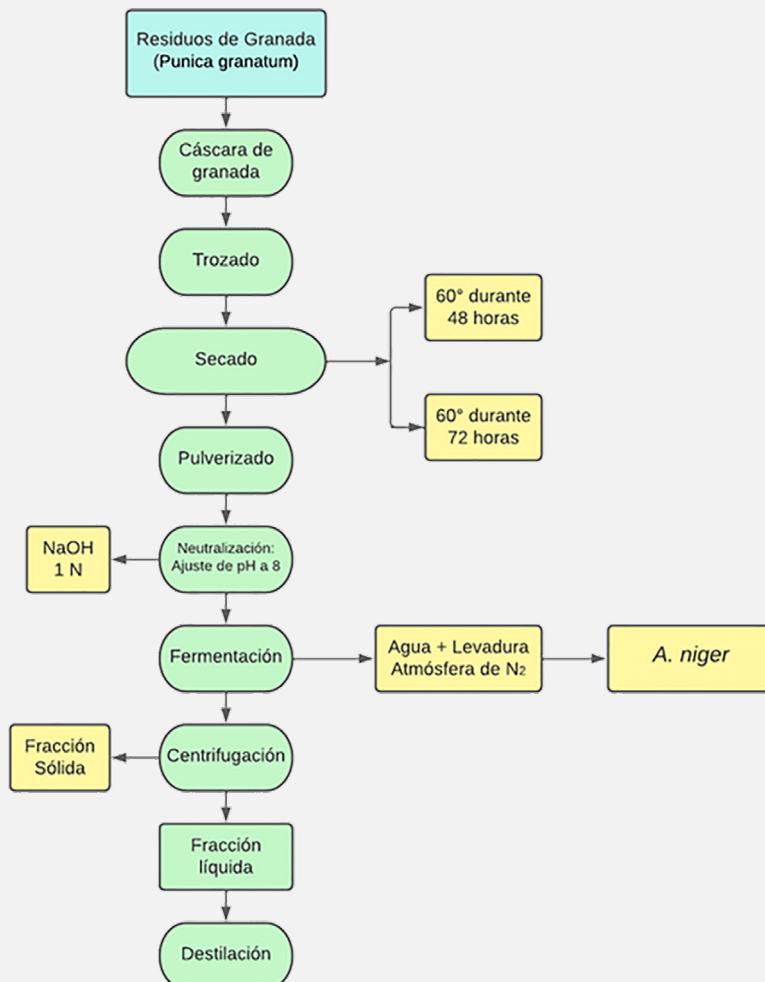
Se ha reportado la obtención de biocombustibles a partir de los residuos agroalimentarios (Santos Tanamachi y col., 2022); dichas rutas tienen etapas similares en la conversión de los productos para la obtención de ácidos orgánicos. Lo anterior permite continuar con el estudio para realizar el análisis de nuevas rutas para la obtención de ácidos orgánicos como co-producto de la obtención de bioetanol y otros biocombustibles mediante una vía fermentativa. En la Figura 2 se presenta la ruta propuesta por Villagómez-Ibarra y col. (2023), en donde se resalta que el pretratamiento y el ajuste de pH es el mismo que se emplea para la obtención de bioetanol, el proceso se direcciona para la conversión de ácidos orgánicos en la etapa de fermentación utilizando el hongo *A. Niger*.

Hasta el momento se han revisado los aspectos más importantes de las rutas de procesamiento para la obtención de biocombustibles a partir de biomasa, así como el potencial que tiene utilizar los residuos agroalimentarios para la producción de estos ácidos; no obstante, se requiere continuar con esfuerzos en las propuestas de novedosas metodologías, que permitan obtener reproducibilidad en la síntesis, rendimientos altos y que sean rutas sustentables para mitigar los impactos con el medio ambiente. Un ejemplo de esto es el proceso de producción de ácido cítrico a partir de residuos agroindustriales,

que utiliza ácido sulfúrico para lograr altos rendimientos en el pretratamiento y la redisolución (Martínez-Ramírez y col., 2023). Esto plantea la necesidad de buscar pretratamientos alternativos más eficientes y procesos de separación que empleen agentes de bajo impacto ambiental pero que sean competitivos económicamente con la ruta tradicional de purificación por precipitación o cristalización (Cerón-Hernández y col., 2024). Además, la implementación de esquemas para aprovechar los residuos en la producción a gran escala de derivados de valor, como los ácidos orgánicos, requiere una planificación adecuada de la cadena de suministro. Un diseño óptimo de esta cadena permite establecer estrategias para la recolección de la materia prima y la distribución de los productos, de modo que se logren esquemas económicamente viables y con bajo impacto ambiental, beneficiando a la sociedad (Gómez-Castro y col., 2022).

Figura 2

Ruta propuesta para la conversión de residuos de granada a ácido cítrico (Villagómez-Ibarra y col., 2023).



Aplicaciones en hidrometalurgia

A continuación, se describirán dos aplicaciones para la extracción de metales en hidrometalurgia. La primera es la recuperación de metales a partir de jales mineros. La segunda aplicación que se describe es la recuperación de metales a partir de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.

Recuperación de metales a partir de jales mineros

Actualmente en México, la minería representa una de las principales actividades que impulsan la economía del país, alrededor de 8 mil mdp al Producto Interno Bruto (PIB) (Banxico, 2022); sin embargo, el desarrollo de esta actividad es la responsable de generar residuos con impacto negativo al medio ambiente. Por ejemplo, sus residuos contribuyen a la contaminación del suelo derivada de la liberación de metales pesados en la extracción (plomo, arsénico y mercurio), generando también lo que se conoce como drenaje ácido de mina, cambiando el pH del suelo. Asimismo, genera destrucción de los hábitats y la erosión del suelo (Araya y col., 2020, 2021). Los jales mineros corresponden a los residuos sólidos resultantes en los procesos metalúrgicos después de haber recuperado los valores de interés tales como Cu, Co, As, Hg, Pb, Zn, Fe, Ag y Au (Ruiz-Sánchez y Juárez-Tapia, 2022). Araya y col., (2020, 2021) reportaron que a nivel mundial la industria minera genera alrededor de 10 billones de toneladas de jales mineros por año, con la tendencia de duplicar esta cantidad en el año 2035. Los métodos que se utilizan para la remoción de metales en estos jales mineros son costosos y generan una gran cantidad de residuos ácidos (Ruiz-Sánchez y Juárez-Tapia, 2022 y Nwaila y col., 2021).

Como una alternativa, la lixiviación es un método utilizado en la hidrometalurgia. Para este proceso, los ácidos orgánicos se han convertido en alternativas interesantes para disolver selectivamente los metales objetivo del mineral contaminante (Astuti y col., 2016). La elección del ácido orgánico depende del metal o mineral específico que se esté procesando. Algunos ejemplos son:

- Ácido oxálico: Se utiliza en la lixiviación de minerales de plomo, paladio y uranio.
- Ácido cítrico: Ayuda en la lixiviación de metales como el cobalto, el silicato y el níquel.
- Ácido acético: Se emplea en la lixiviación de minerales de uranio y de hierro.

Es importante destacar que la selectividad en la extracción de metales provenientes de jales mineros podría incrementar el costo de operación. No obstante, este aumento podría compensarse mediante la reducción del impacto ambiental, lo cual se lograría considerando los siguientes factores: i) inversión en tecnologías avanzadas que sustituyan las convencionales, ii) amortización del aumento de costos, minimizando la contaminación al ser más selectivo y reduciendo la liberación de metales, iii) ahorro en multas y regulaciones gracias a extracciones más eficientes, y iv) recuperación y aprovechamiento de metales valiosos.

Recuperación de metales a partir de jales mineros

Otra de las aplicaciones importantes que pueden tener los ácidos orgánicos es la recuperación de metales que forman parte de la estructura de los residuos electrónicos, pues los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) se han convertido en un problema medioambiental con alto impacto. En algunos países los RAEE constituyen el 8% del total de los residuos municipales, y mundialmente representan entre el 1% y el 3% de los residuos totales generados (Priya y Hait, 2018; Işildar y col., 2018).

Adicionalmente, los componentes de este tipo de residuos son los que presentan mayor crecimiento a nivel mundial (Priya y Hait, 2018), con una tasa del 3% al 5% por año, y una producción anual en promedio, de entre 20 y 50 millones de toneladas (Kaya, 2018). Una de las problemáticas es que no existe una correcta disposición de los RAEE (Ghodrat y col., 2017; Diaz y Lister, 2018), lo que genera acumulación de estos materiales a nivel mundial, sin tratar ni aprovechar los diferentes componentes que constituyen a dichos residuos.

Los procesos que actualmente se utilizan para el tratamiento de metales a partir de los RAEE se basan en la recuperación de cobre, estaño, cobalto, plata, oro, paladio y platino (Awasthi y Li, 2017); pero las metodologías convencionales generan sustancias tóxicas a la atmósfera, como los bromuros de llama retardante, además, contaminan las fuentes de agua en procesos subsecuentes de recuperación y extracción de los materiales metálicos (Gurgul y col., 2018; Chauhan y col., 2018). Por lo anterior, se deben desarrollar nuevas propuestas direccionadas a la implementación de la recolección y separación de los residuos; igualmente, deben enfocarse los esfuerzos al desarrollo de metodologías para la extracción de materiales de formas más sustentables, evitando la generación de residuos tóxicos y realizando síntesis de los precursores más amigables

con el medio ambiente. Estas dos importantes aplicaciones en la extracción y remoción de metales permiten visualizar que se deben aumentar los esfuerzos para mejorar la utilización de los ácidos orgánicos en la hidrometalurgia; de este modo, se pueden considerar varias estrategias para su desarrollo:

- Optimizar las condiciones de lixiviación, como la concentración del ácido, la temperatura, el tiempo de contacto y el pH, para maximizar la eficiencia de la disolución de los metales.
- La aplicación de ácidos orgánicos en esta industria, obtenidos a partir de la biomasa como lo son los residuos agroalimentarios.
- Evaluar y seleccionar el ácido orgánico más adecuado según las propiedades químicas y la afinidad por el metal objetivo.
- Recuperar y reciclar los ácidos orgánicos utilizados, lo que ayuda a reducir costos y minimizar los impactos ambientales.

Conclusiones

Los ácidos orgánicos son materiales con potencial para reemplazar a los ácidos inorgánicos en una diversidad de aplicaciones, siendo compuestos menos agresivos con el medio ambiente, además de que pueden obtenerse mediante la biomasa. De manera particular, es posible producirlos a partir de residuos orgánicos, lo que contribuye a dar un segundo uso a materiales actualmente considerados como desecho, aportando de esta manera a la economía circular. Adicionalmente, entre las aplicaciones que se pueden dar a estos componentes se encuentra la recuperación de metales a partir de relaves mineros o de residuos electrónicos, lo cual, a su vez, reduce la necesidad de extraer y procesar nuevos minerales, promoviendo así estrategias de producción más sostenibles. Sin embargo, la producción de ácidos orgánicos a partir de biomasa residual presenta aún desafíos entre los que se encuentra la urgencia por incrementar los rendimientos de conversión, así como la búsqueda de nuevas estrategias para su purificación que reduzcan la necesidad de emplear agentes externos y que requieran una menor cantidad de energía. De esta manera, el desarrollo de tecnologías mejoradas para la conversión de biomasa es imperativa. Asimismo, la co-producción de otros derivados de esta es importante para la sostenibilidad económica de los procesos productivos, junto con la elección de cadenas de suministro factibles.

Agradecimientos

Los autores agradecen profundamente el apoyo de la Universidad de Guanajuato a través de la Dirección de Apoyo a la Investigación y Posgrado, a través del proyecto 118/2023.

Referencias

- Agreda, V. H., & Zoeller, J.R. (1992). *Acetic acid and its derivatives*. CRC Press.
- Aliano, N. P., & Ellis, M. D. (2009). Oxalic acid: a prospective tool for reducing *Varroa* mite populations in package bees. *Experimental and Applied Acarology*, 48(4), 303-309. <https://doi.org/10.1007/s10493-009-9240-8>
- Araya, N., Kraslawski, A., & Cisternas, L. A. (2020). Towards mine tailings valorization: Recovery of critical materials from Chilean mine tailings. *Journal of Cleaner Production*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121555>
- Araya, N., Ramírez, Y., Kraslawski, A., Cisternas, L. A., & Ramírez Y. (2021). Feasibility of re-processing mine tailings to obtain critical raw materials using real options analysis. *Journal of Environmental Management*, 284(02). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112060>
- Astuti, W., Hirajima, T., Sasaki, K., & Okibe, N. (2016). Comparison of effectiveness of citric acid and other acids in leaching of low-grade Indonesian saprolitic ores. *Minerals Engineering*, 85, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.10.001>
- Awasthi, A., & Li, J. (2017). An overview of the potential of eco-friendly hybrid strategy for metal recycling from WEEE. *Resources, Conservation and Recycling*, 126, 228-239. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.014>
- Banxico. (2022). *Sistema de Información Económica*. <https://www.banxico.org.mx/SielInternet/consultarDirectorioInternetAction.do?sector=2&idCuadro=CR199&accion=consultarCuadro&locale=es>
- Behera, B. C. (2020). Citric acid from *Aspergillus niger*: a comprehensive overview. *Critical Reviews in Microbiology*, 46(6), 727-749. <https://doi.org/10.1080/1040841X.2020.1828815>
- Blumhoff, M. L., Steiger, M. G., Mattanovich, D., & Sauer, M. (2013). Targeting enzymes to the right compartment: Metabolic engineering for itaconic acid production by *Aspergillus niger*. *Metabolic Engineering*, 19, 26-32. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2013.05.003>
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68-94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- Brown, S. H., Bashkirova, L., Berka, R., Chandler, T., Doty, T., McCall, K., McCulloch, M., McFarland, S., Thompson, S., Yaver, D., & Berry, A.

- (2013). Metabolic engineering of *Aspergillus oryzae* NRRL 3488 for increased production of L-malic acid. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97(19), 8903–8912. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5132-2>
- Caltzontzin-Rabell, V., Romero-Izquierdo, A. G., Moreno-Gómez, A. L., Martínez-Guido, S. I., Gómez-Castro, F. I., & Gutiérrez-Antonio, C. (2022). Raw materials for a biomass-based industry. En C. Gutiérrez-Antonio y F. I. Gómez-Castro (Eds.), *Biofuels and Biorefining Volume 1: Current Technologies for Biomass Conversion* (pp. 25–52). Elsevier.
- Cerón-Hernández, J. A., Romero-Izquierdo, A. G., & Gómez-Castro, F. I. (2024). Análisis comparativo de esquemas de purificación en la obtención de ácido cítrico a partir de biomasa. *Avances en Ingeniería Química*, 3(1), PRO45-PRO50.
- Chauhan, G., Jadhao, P. R., Pant, K. K., & Nigam, K. D. P. (2018). Novel technologies and conventional processes for recovery of metals from waste electrical and electronic equipment: challenges & opportunities – A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(1), 1288–1304. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.01.032>
- Chen, G. Q., & Liu, X. (2021). On the future fermentation. *Microbial Biotechnology*, 14(1), 18–21. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13674>
- Curran, K. A., Leavitt, J. M., Karim, A. S., & Alper, H. S. (2013). Metabolic engineering of muconic acid production in *Saccharomyces cerevisiae*. *Metabolic Engineering*, 15, 55–66. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2012.11.003>
- Datta, R., & Henry, M. (2006). Lactic acid: recent advances in products, processes and technologies – a review. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 81(7), 1119–1129. <https://doi.org/10.1002/jctb.1486>
- Diaz, L. A., & Lister, T. E. (2018). Economic evaluation of an electrochemical process for the recovery of metals from electronic waste. *Waste Management*, 74, 384–392. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.050>
- Dustet Mendoza, J. C., & Izquierdo Kulich, E. (2004). Aplicación de balances de masa y energía al proceso de fermentación en estado sólido de bagazo de caña de azúcar con *Aspergillus niger*. *Bioteología Aplicada*, 21(2), 85–91. <https://biblat.unam.mx/hevila/Bioteologiaaplicada/2004/vol21/no2/5.pdf>
- Espinoza-Vázquez, Y. M., Hernández-Camacho, N. V., & Gómez-Castro, F. I. (2023). Agricultural residues as raw materials for a bio-based industry. En A. Norton, D. Scheff y L.M. Gilbertson (Eds.), *Sustainable Agricultural Practices and Product Design* (pp. 77–99). ACS.

- Flores, P., Hellín, P. & Fenoll, J. (2012). Determination of organic acids in fruits and vegetables by liquid chromatography with tandem-mass spectrometry. *Food Chemistry*, 132(2), 1049-1054. [10.1016/j.foodchem.2011.10.064](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.10.064)
- Gallardo Martínez, D., Cabrera Díaz, I., Bruguera Amaran, N., & Mardrazo Escalona, F. (2013). Evaluación de impactos ambientales provocados por la actividad minera en la localidad de Santa Lucía, Pinar del Río. *Avances*, 15(1), 98-116.
- García-Mujica, R., & Benavides-Cedeño, G. (2020). Diseño de una planta a escala industrial para la elaboración de ácido láctico mediante fermentación líquida. *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación*, 3(5), 25-34. <https://doi.org/10.46296/ig.v3i5.0013>
- Ghodrat, M., Rhamdhani, M. A., Brooks, G., Rashidi, M., & Samali, B. (2017). A thermodynamic-based life cycle assessment of precious metal recycling out of waste printed circuit board through secondary copper smelting. *Environmental Development*, 24, 36-49. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2017.07.001>
- Gómez Castro, F. I., González-Guerra, G. M., Restrepo-Elorza, M.d.P., Montiel-Carrillo, A. P., Álvarez-Rivera, K. Y., Linares-Luna, R. G., & Hernández, S. (2022). Residuos de frutas y vegetales como materias primas para la producción de biocombustibles: potencial en el estado de Guanajuato. *Digital Ciencia@UAQRO*, 15(1), 8-19. <https://revistas.uaq.mx/index.php/ciencia/article/view/697>
- Gómez-Castro, F. I., Espinoza-Vázquez, Y. M., & Ponce-Ortega, J. M. (2022). Modeling and optimization of supply chains: Applications to conventional and intensified biorefineries. En C. Gutiérrez-Antonio y F. I. Gómez-Castro (Eds.), *Biofuels and Biorefining Volume 2: Intensified Processes and Biorefineries* (pp. 361-388). Elsevier.
- González-Guerra, G. M., Garate Ruiz, J. R., Santos Tanamachi, K., Restrepo-Elorza, M.d.P., Gómez-Castro, F. I., Hernández, S., García-García, J. C., & Gamiño-Arroyo, Z. (2024). Synthesis of bioethanol from mixed vegetable wastes: Experimental methodology and characterization. *Engineering Reports*, 6(7). <https://doi.org/10.1002/eng2.12784>
- Grand View Research. (2023). *Organic chemicals*. <http://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/acetac-acid-market>
- Guadalupe-Alcoser, M. A., Salazar-Llangarí, K. G., Rodríguez-Pinos, A. A., y Brito-Moína, H. L. (2021). Evaluación del proceso de producción de ácido cítrico por fermentación con el uso de *Aspergillus niger*. *Dominio de las Ciencias*, 7(3), 1136-1158. <https://doi.org/10.23857/dc.v7i3.2045>
- Gurgul, A., Szczepaniak, W., & Zabłocka-Malicka, M. (2018). Incineration and pyrolysis vs. steam gasification of electronic waste.

- Science of The Total Environment*, 624, 1119–1124. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.151>
- Gurtler, J. B., & Mai, T. L. (2014). Traditional preservatives – organic acids. En C.A. Batt y M.L. Tortorello (Eds.), *Encyclopedia of Food Microbiology*, 2ª edición (pp. 119–130). Academic Press.
- He, K., Liu, Y., Tian, L., He, W., & Cheng, Q. (2024). Review in anaerobic digestion of food waste. *Heliyon*, 10(7). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28200>
- ICIS. (s.f.). *Acetic acid, market, prices and analysis*. <http://www.icis.com/chemicals/acetic-acid/?tab=tbc-tab4>
- Ijmker, H., Gramblička, M., Kersten, S. R. A., van der Ham, A. G. J., & Schuur, B. (2014). Acetic acid extraction from aqueous solutions using fatty acids. *Separation and Purification Technology*, 125, 256–263. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.01.050>
- Işıldar, A., Rene, E. R., van Hullebusch, E. D., & Lens, P. N. L. (2018). Electronic waste as a secondary source of critical metals: Management and recovery technologies. *Resources, Conservation and Recycling*, 135, 296–312. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.031>
- Kaya, M. (2018). Current WEEE recycling solutions. En F. Vegliò y I. Birloaga (Eds.), *Waste Electrical and Electronic Equipment Recycling: Aqueous Recovery Methods* (pp. 33–93). Woodhead Publishing.
- Kuivanen, J., Mojzita, D., Wang, Y., Hilditch, S., Pennttila, M., Richard, P., & Wiebe, M. G. (2012). Engineering filamentous fungi for conversion of D-galacturonic acid to L-galactonic acid. *Applied and Environmental Microbiology*, 78(24), 8676–8683. <https://doi.org/10.1128/AEM.02171-12>
- Kutney, G. (2007). *Sulfur: History, Technology, Applications & Industry*. ChemTec Publishing.
- Lambros, M., Tran, T., Fei, Q., & Nicolaou, M. (2022). Citric acid: a multifunctional pharmaceutical excipient. *Pharmaceutics*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14050972>
- Lim, J., Fernández, C. A., Lee, S. W., & Hatzell, M. C. (2021). Ammonia and nitric acid demands for fertilizer use in 2050. *ACS Energy Lett.*, 6(10), 3676–3685. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.1c01614>
- Litsanov, B., Brocker, M., & Bott, M. (2013). Glycerol as a substrate for aerobic succinate production in minimal medium with *Corynebacterium glutamicum*. *Microbial Biotechnology*, 6(2), 189–195. <https://doi.org/10.1111/j.1751-7915.2012.00347.x>
- Liu, R., Liang, L., Cao, W., Mingke, W., Chen, K., Jiangfeng, M., Jiang, M., Wei, P., & Ouyang, P. (2013). Succinate production by metabolically engineered *Escherichia coli* using sugarcane bagasse hydrolysate as the carbon source. *Bioresource Technology*, 135, 574–577. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.120>

- Liu, Z. (2023). A review on the emerging conversion technology of cellulose, starch, lignin, protein and other organics from vegetable-fruit-based waste. *International Journal of Biological Macromolecules*, 242. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124804>
- Liu, H., Zhen, F., Wu, D., Wang, Z., Kong, X., Li, Y., Xing, T., & Sun, Y. (2023). Co-production of lactate and volatile fatty acids through repeated-batch fermentation of fruit and vegetable waste: effect of cycle time and replacement ratio. *Bioresource Technology*, 387(3). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129678>
- Martínez-Ramírez, G. G., Gamiño-Arroyo, Z., & Gómez-Castro, F. I. (2023). Análisis comparativo del impacto ambiental en los procesos productivos de agentes lixiviantes. *Avances en Ingeniería Química*, 2(1), PRO7-PRO11.
- Nwaila, G. T., Ghorbani, Y., Zhang, S. E., Frimmel, H. E., Tolmay, L. C. K., Rose, D. H., Nwaila, P. C., & Bourdeau, J. E. (2021). Valorisation of mine waste-Part I: Characteristics of, and sampling methodology for, consolidated mineralised tailings by using Witwatersrand Gold Mines (South Africa) as an example. *Journal of Environmental Management*, 295. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113013>
- Nygaard, Y., Toivari, M. H., Penttilä, M., Ruohonen, L., & Wiebe, M.G. (2011). Bioconversion of D-xylose to D-xylonate with *Kluyveromyces lactis*. *Metabolic Engineering*, 13(4), 383-391. <https://doi.org/10.1016/j.mben.2011.05.002>
- Ochoa Gómez, J. R. (2003). Síntesis de ácido oxálico por electrorreducción de dióxido de carbono, un proceso medioambientalmente compatible. *Tecnología y Desarrollo*, 1, 3-21.
- Olofsson, J., & Börjesson, P. (2018). Residual biomass as resource – Life-cycle environmental impact of wastes in circular resource systems. *Journal of Cleaner Production*, 196, 997-1006. [10.1016/j.jclepro.2018.06.115](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.115)
- Omanov, B. Sh., Fayzullaev, N. I., Musulmonov, N. Kh., Xatamova, M. S., & Asrorov, D. A. (2020). Optimization of vinyl acetate synthesis process. *International Journal of Control and Automation*, 13(1), 231-238.
- Papagianni, M. (2011). Organic Acids. En M. Moo-Young (Ed.), *Comprehensive Biotechnology*, Vol. 1, 2ª edición (pp. 109-120). Pergamon.
- Precedence Research (2022). *Sulfuric acid market*. <https://www.precedenceresearch.com/sulfuric-acid-market#:~:text=The%20global%20sulfuric%20acid%20market,of%20the%20overall%20acids%20market>.
- Priya, A., & Hait, S. (2018). Toxicity characterization of metals from various waste printed circuit boards. *Process Safety and Environmental Protection*, 116, 74-81. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.01.018>

- Punt, T., Akdogan, G., Bradshaw, S., & van Wyk, P. (2021). Development of a novel solvent extraction process using citric acid for lithium-ion battery recycling. *Minerals Engineering*, 173. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107204>
- Rathore, A. S., & Singh, A. (2021). Biomass to fuels and chemicals: A review of enabling processes and technologies. *Journal Of Chemical Technology & Biotechnology*, 97(3), 597-607. <https://doi.org/10.1002/jctb.6960>
- Ripoll, X. P. (2011). *Obtención de exopolisacáridos de interés industrial a partir del lactosuero y permeatos* [Tesis Doctoral, Universidad de Granada]. Repositorio Institucional. <https://digibug.ugr.es/bitstream/10481/2376/1/18101604.pdf>
- Rodríguez-Domínguez, J. C., & Kirsch, G. (2006). Sulfated zirconia, a mild alternative to mineral acids in the synthesis of hydroxycoumarins. *Tetrahedron Letters*, 47(19), 3279-3281. <https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2006.03.030>
- Roukas, T., & Kotzekidou, P. (2020). Pomegranate peel waste: a new substrate for citric acid production by *Aspergillus niger* in solid-state fermentation under non-aseptic conditions. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 13105-13113. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07928-9>
- Ruiz-Sánchez, A., & Juárez-Tapia, J. C. (2022). Obtención de cobre metálico a partir de la lixiviación de jales mineros originarios del estado de Zacatecas. *PADI Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10(Especial 7), 1-9. <https://doi.org/10.29057/icbi.v10iespecial7.9826>
- Sánchez Toro, O. J., Ortiz Buriticá, M. C., & Betancourt Garcés, A. L. (2004). Obtención de ácido cítrico a partir de suero de leche por fermentación con *Aspergillus* spp. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 6(1), 43-54. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote>
- Santos Tanamachi, K., Alvarado Ahedo, N. C., Gárate Ruiz, J. R., Restrepo Elorza, M.d.P., González Guerra, G. M., Gómez Castro, F. I., & Hernández Castro, S. (2022). Revaloración de residuos de fruta y verdura para la producción de biocombustibles. *Jóvenes en la Ciencia*, 16, 1-14. <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3654>
- Scapinello, C., Furlan, A. C., & García de Faria, H. (1999). Influência de diferentes níveis de ácido fumárico sobre o desempenho de coelhos em crescimento. *Revista Brasileira De Zootecnia*, 28(4), 785-790. <https://doi.org/10.1590/s1516-35981999000400019>
- Soccol, C. R., Vandenberghe, L. P. S., Rodrigues, C., & Pandey, A. (2006). New perspectives for citric acid production and application. *Food Technology and Biotechnology*, 44(2), 141-149. <https://www>

- ftb.com.hr/archives/443-new-perspectives-for-citric-acid-production-and-application
- Speight, J. G. (2018). *Reaction Mechanisms in Environmental Engineering: Analysis and Prediction*. Butterworth-Heinemann.
- Sreenath, H. K., Moldes, A. B., Koegel, R. G., & Straub, R. J. (2001). Lactic acid production from agriculture residues. *Biotechnology Letters*, 23(3), 179-184. <https://doi.org/10.1023/a:1005651117831>
- Statista (2023a). *Market volume of sulfuric acid worldwide from 2015 to 2022, with a forecast for 2023 to 2030*. <https://www.statista.com/statistics/1245226/sulfuric-acid-market-volume-worldwide/>.
- Statista (2023b). *Market volume of acetic acid worldwide from 2015 to 2022, with a forecast for 2023 to 2030*. <https://www.statista.com/statistics/1245203/acetic-acid-market-volume-worldwide/>.
- Statista (2023c). *Market volume of lactic acid worldwide from 2015 to 2022, with a forecast for 2023 to 2030*. <https://www.statista.com/statistics/1310495/lactic-acid-market-volume-worldwide/>.
- Thakker, C., San, K. Y., & Bennett, G. N. (2013). Production of succinic acid by engineered *E. coli* strains using soybean carbohydrates as feedstock under aerobic fermentation conditions. *Biore-source Technology*, 130C(12), 398-405. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.154>
- Theron, M. M., & Lues, J. F. R. (2010a). Microbial organic acid producers. En M.M. Theron y J.R.R. Lues (Eds.) *Organic Acids and Food Preservation* (pp. 97-115). CRC Press.
- Theron, M. M., & Lues, J. F. R. (2010b). Novel applications for organic acids. En M.M. Theron y J.R.R. Lues (Eds.) *Organic Acids and Food Preservation* (pp. 316-324). CRC Press.
- Thomas, C. M., & Süss-Fink, G. (2003). Ligand effects in the rhodium-catalyzed carbonylation of methanol. *Coordination Chemistry Reviews*, 243(1-2), 125-142. [https://doi.org/10.1016/S0010-8545\(03\)00051-1](https://doi.org/10.1016/S0010-8545(03)00051-1)
- Toivari, M. H., Nygard, Y., Kumpula, E.-P., Vehkomäki, M.-L., Bencina, M., Valkonen, M., Maaheimo, H., Blomster Andberg, M., Koivula, A., Ruohonen, L., Penttilä, M., & Wiebe, M. G. (2012). Metabolic engineering of *Saccharomyces cerevisiae* for bioconversion of D-xylose to D-xylonate. *Metabolic Engineering*, 14(4), 427-436. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2012.03.002>
- Toivari, M., Vehkomäki, M.-L., Nygard, Y., Penttilä, M., Ruohonen, L., & Wiebe, M. G. (2013). Low pH D-xylonate production with *Pichia kudriavzevii*. *Biore-source Technology*, 133C, 555-562. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.01.157>
- Vandenbergh, L. P. S., Soccol, C. R., Pandey, A., & Lebeault II, J. M. (1999). Microbial production of citric acid. *Brazilian Archives of*

- Biology and Technology*, 42(3), 263-276. <https://doi.org/10.1590/s1516-89131999000300001>
- Vidra, A., & Németh, Á. (2018). Bio-produced acetic acid: a review. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 62(3), 245-256. <https://doi.org/10.3311/PPCh.11004>
- Villagómez-Ibarra, J., Nava-Hernández, C. V., Flores-Juárez, E. I., Martínez-Cortés, O. I., González-Guerra, G. M., & Gómez-Castro, F. I. (2023). Co-producción de biocombustibles y ácidos orgánicos a partir de residuos de frutas y vegetales. *Jóvenes en la Ciencia*, 21, 1-10. <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/4007>
- Wang, X., Chen, J., Yan, X., Wang, X., Zhang, J., Huang, J., & Zhao, J. (2015). Heavy metal chemical extraction from industrial and municipal mixed sludge by ultrasound-assisted citric acid. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 27, 368-372. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.01.016>
- Weissermel, K., & Arpe, H.-J. (2003). *Industrial Organic Chemistry*, Wiley-VCH.
- Xiao, J., Li, J., & Xu, Z. (2020). Challenges to future development of spent lithium ion batteries recovery from environmental and technological perspectives. *Environmental Science & Technology*, 54(1), 9-25. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03725>
- Yan, W., Guan, Q., & Jin, F. (2023). Catalytic conversion of cellulosic biomass to harvest high-valued organic acids. *iScience*, 26(10). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.107933>
- Zhang, B., Skory, C. D., & Yang, S. T. (2012). Metabolic engineering of *Rhizopus oryzae*: effects of overexpressing pyc and pepc genes on fumaric acid biosynthesis from glucose. *Metabolic Engineering*, 14(5), 512-520. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2012.07.001>

Co-producción de bioetanol y bioproductos en procesos intensificados: hacia la factibilidad económica de la bioindustria

Co-production of bioethanol and bioproducts in intensified processes: towards the economic feasibility of the bioindustry

Yulissa Mercedes Espinoza-Vázquez

Fernando Israel Gómez-Castro*

Eduardo Sánchez-Ramírez

Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México

Araceli Guadalupe Romero-Izquierdo

Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México

* fgomez@ugto.mx

Fecha de recepción: 16 de diciembre del 2023

Fecha de aceptación: 21 de junio del 2024

Resumen

Los biocombustibles derivados de residuos de biomasa lignocelulósica presentan una alternativa sostenible al permitir la reutilización de desechos y la sustitución de combustibles fósiles. No obstante, la rentabilidad de la producción de biocombustibles sigue siendo limitada, lo que ha impulsado la adopción de un enfoque de producción simultánea de otros bioproductos mediante esquemas de biorrefinería. Entre los biocombustibles, el bioetanol se destaca por su capacidad para sustituir a la gasolina en ciertos porcentajes. En cuanto a los bioproductos de alto valor agregado, se puede mencionar al furfural y el ácido láctico. A pesar de estas opciones, su viabilidad puede verse comprometida si no se establecen esquemas competitivos económicamente frente a las fuentes fósiles. En este contexto, la intensificación de procesos desempeña un papel crucial, ya que podría contribuir a desarrollar procesos más compactos y con menor consumo de energía. Este estudio realiza un análisis de las propuestas existentes en los procesos de conversión de biomasa a bioetanol, así como en los procesos de purificación de bioproductos como el ácido láctico y el furfural, y abarca tanto métodos convencionales como intensificados. El objetivo es resaltar el esquema de biorrefinería y explorar el potencial de



la co-producción de bioetanol y bioproductos, considerando tanto la perspectiva económica como la ambiental.

Palabras clave: ácido láctico, biorrefinería, furfural, intensificación de procesos

Abstract

Biofuels derived from lignocellulosic biomass residues present a sustainable alternative, by enabling the reuse of waste materials and replacing fossil fuels. However, the profitability of biofuel production remains limited, prompting the adoption of a simultaneous production approach for other bioproducts through biorefinery schemes. Among biofuels, bioethanol stands out for its ability to replace gasoline in certain percentages. High value added bioproducts include furfural and lactic acid. Despite these options, their viability may be compromised if economically competitive schemes compared to fossil sources are not established. In this context, process intensification plays a crucial role, as it could help develop more compact processes with reduced energy consumption. This study analyzes existing proposals for the conversion processes of biomass to bioethanol, as well as the purification processes of bioproducts such as lactic acid and furfural, covering both conventional and intensified methods. The objective is to highlight the biorefinery scheme and explore the potential for the co-production of bioethanol and bioproducts, considering both economic and environmental perspectives.

Keywords: lactic acid, biorefinery, furfural, process intensification

Introducción

El uso de combustibles fósiles presenta desventajas ambientales significativas, ya que se obtienen de fuentes no renovables y emiten grandes cantidades de gases de efecto invernadero al quemarse. A pesar de estas desventajas, su consumo se ha mantenido constante a lo largo de los años; en 2021 representaron el 77% del sistema energético mundial, el mismo porcentaje que hace 30 años (Ritchie *et al.*, 2022). Ante la necesidad urgente de cambiar las estrategias para satisfacer las demandas energéticas de la humanidad, surge el concepto de biocombustibles. Los biocombustibles son combustibles renovables generados mediante el procesamiento de biomasa. En este contexto, la biomasa se define como cualquier material orgánico renovable proveniente de plantas y animales. Específicamente en México, existe una abundancia de

residuos agrícolas, como bagazo, rastrojo, entre otros; estos materiales se conocen como biomasa lignocelulósica y están compuestos generalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina, cuyo porcentaje depende del tipo de cultivo y características, tal como muestra la Tabla 1.

Tabla 1

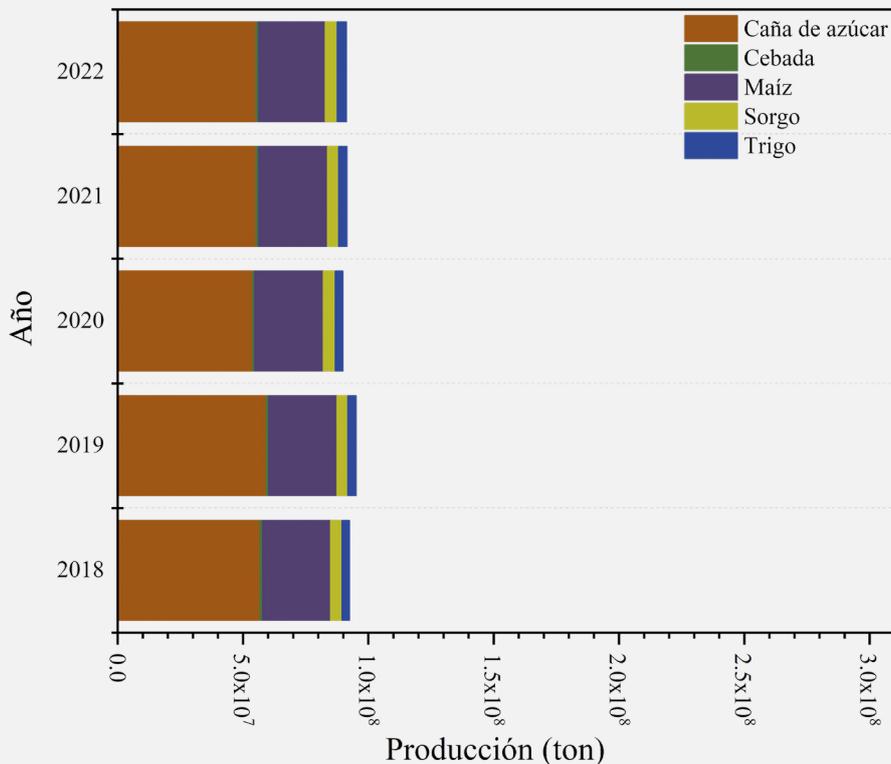
Composición de biomasa lignocelulósica
(Garrot *et al.*, 1999; Kumar-Saini *et al.*, 2014)

	Bagazo de caña de azúcar	Rastrojo de maíz	Rastrojo de trigo	Rastrojo de cebada	Rastrojo de sorgo
Celulosa	40-41.3	38-40	33-38	31-45	32
Hemicelulosa	27-37.5	28	26-32	27-38	24
Lignina	10-20	7-21	17-19	14-19	13

Los rastrojos son una fuente de material lignocelulósico para la producción de bioenergía (O'Connell *et al.*, 2007), desafortunadamente, el 20% de los residuos de este tipo se suele quemar después de la cosecha del grano con la finalidad de eliminar los materiales de desecho del campo (Damián-Huato y col., 2013; Law Corner, 2021). Al realizar esta actividad se contribuye significativamente a la contaminación del aire, ya que se generan gases de efecto invernadero, por ello es importante considerar rutas de aprovechamiento y valorización para estos desechos. Específicamente en México, existe un gran potencial para la producción de biocombustibles provenientes principalmente de residuos de caña de azúcar, maíz, trigo, cebada y sorgo. La Figura 1 muestra que la producción de estos cultivos entre 2018 y 2022 supera un promedio anual de 90,000,000 toneladas (FAO, 2023). México es responsable del 2.88% de la producción mundial de caña de azúcar, el 0.63% de cebada, el 2.29% de maíz, el 8.26% de sorgo y el 0.44% de trigo, esta constancia en la producción ofrece un área de oportunidad significativa para la valorización de residuos lignocelulósicos. Por lo tanto, la producción de biocombustibles a partir de estos desechos contribuye a resolver ambas problemáticas, pues se aprovecha una fuente abundante de biomasa y se reduce la contaminación ambiental.

Figura 1

Producción anual de cultivos en toneladas, del 2018 al 2022.
(FAO, 2023).



Es importante mencionar que la producción de biocombustibles, por sí misma, no es totalmente rentable (Reboredo *et al.*, 2017). Esto evidencia la necesidad de aprovechar de forma integral la biomasa disponible, lo cual es posible si se producen simultáneamente bioproductos de alto valor agregado. Estos bioproductos, al ser añadidos a la producción de biocombustibles, pueden mejorar los indicadores económicos del esquema productivo, ejemplos de tales productos son el furfural y el ácido láctico, que se generan en cantidades significativas durante el proceso de conversión de biomasa a bioetanol, lo que significa que existe la posibilidad de desarrollar esquemas para la purificación de estos subproductos. Sin embargo, a pesar de la producción simultánea de bioetanol y bioproductos, es posible que no se alcance aún la factibilidad económica en comparación con la obtención de estos a partir de combustibles fósiles debido al costo adicional asociado a la purificación de los coproductos. En este aspecto, surge la intensificación de procesos (PI, por sus siglas en inglés), que se define como una mejora de un proceso a nivel operativo y/o funcional obtenida mediante la integración de operaciones unitarias (Lutze *et al.*, 2013). PI desempeña un papel clave al promover el desarrollo

de procesos compactos, con consumo de energía reducido, más seguros y respetuosos con el medio ambiente.

En la literatura existen diversos artículos referentes a la obtención de bioetanol a partir de residuos de maíz (Tan *et al.*, 2013), residuos de trigo (Talebnia *et al.*, 2010), entre otras materias primas. No obstante, no se menciona el aprovechamiento de los componentes inhibidores, lo cual podría realzar el enfoque de biorrefinería, que se refiere a una instalación que integra procesos y equipos de conversión de biomasa para la producción de combustibles, electricidad y productos químicos. En este artículo se presentan generalidades sobre los procesos de transformación de residuos agroindustriales en bioetanol y bioproductos de alto valor agregado, en particular furfural y ácido láctico. Se analizan tanto los esquemas convencionales como las propuestas en esquemas intensificados con el fin de destacar el mejor diseño y permitir en el futuro la integración en un único proceso teniendo en cuenta indicadores económicos y ambientales.

Conversión de residuos a bioetanol

La producción de bioetanol a partir de materiales lignocelulósicos implica una serie de etapas, desde la descomposición de la estructura de la materia prima hasta la separación del bioetanol con la pureza deseada, tal como se muestra en la Figura 2. El primer paso es el pretratamiento, que consiste en separar la lignina de la celulosa y la hemicelulosa presentes en la biomasa (Mankar *et al.*, 2021). Esta separación es esencial para las etapas posteriores de conversión (hidrólisis y fermentación), ya que la lignina dificulta el acceso de los reactivos empleados en la hidrólisis hacia la celulosa y la hemicelulosa. Los pretratamientos de la biomasa lignocelulósica deben de cumplir ciertos requisitos, que incluyen:

- Aumentar la producción de los azúcares pentosa y hexosa.
- Evitar la pérdida de compuestos azucarados.
- Tener una baja producción de compuestos inhibidores.
- Ser un proceso económicamente viable y respetuoso con el medio ambiente.

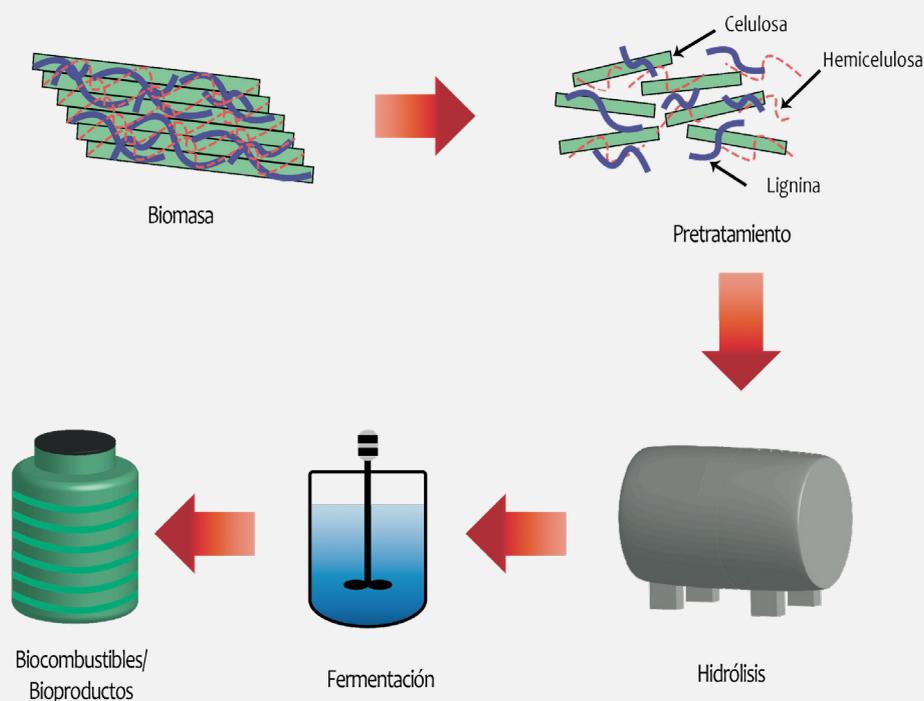
Entre los métodos de pretratamiento con mayores rendimientos se encuentran la explosión de agua caliente líquida (LHW, por sus siglas en inglés), la explosión de vapor de agua (SE, por sus siglas en inglés), la explosión de fibra de amoníaco (AFEX, por sus siglas en inglés), y el ácido diluido (DA, por sus siglas

en inglés) (Conde-Mejía, *et al.*, 2012). El método de explosión de agua caliente líquida utiliza vapor (180-240 °C) bajo presión (1-3.5 MPa) para interrumpir la unión de los componentes poliméricos y descomprimir la estructura de la celulosa (Shrotri *et al.*, 2017; Bandyopadhyay-Ghosh *et al.*, 2015). El método de agua caliente líquida es similar, pero emplea agua caliente a temperaturas entre 170 y 230 °C (Shah *et al.*, 2022). Durante este pretratamiento, la mayor parte de la hemicelulosa se solubiliza, lo que provoca que la celulosa sea más accesible, mientras que la lignina permanece en la fase sólida. En la explosión de fibra de amoníaco, los materiales lignocelulósicos se exponen a amoníaco concentrado líquido a alta presión, seguido de una rápida reducción de presión (Kumar *et al.*, 2009). Finalmente, el pretratamiento con ácido diluido consiste en la hidrólisis del material lignocelulósico mediante ácidos, típicamente ácido sulfúrico, clorhídrico o fosfórico en concentraciones del 1% al 10%, a temperaturas moderadas, en el rango de 100 °C a 180 °C (Wingren *et al.*, 2003). Las principales ventajas de este método son que el ácido puede penetrar en la lignina sin necesidad de otros pretratamientos como los enzimáticos, bacterianos, de alta presión o temperatura, y que la velocidad de la hidrólisis ácida es más rápida que la enzimática (Hong *et al.*, 2012).

Figura 2

Proceso de conversión de biomasa.

Modificado de Osman *et al.* (2021).



De los procesos previamente mencionados para la biomasa lignocelulósica, el pretratamiento con ácido diluido ha demostrado mejores rendimientos, menores costos de operación y un mejor compromiso con el medio ambiente (Conde-Mejía *et al.*, 2012). Posterior al proceso de pretratamiento, se realiza la hidrólisis, cuyo objetivo es descomponer la celulosa y hemicelulosa presentes en la materia prima en azúcares fermentables (monómeros de azúcar) para la producción de bioetanol. Una vez realizada, se lleva a cabo la fermentación, que implica la conversión de los azúcares monoméricos obtenidos en el paso previo mediante microorganismos como levaduras, hongos o bacterias (Senatore *et al.*, 2020). El microorganismo más utilizado es la levadura *Saccharomyces cerevisiae* debido a su compatibilidad con las altas temperaturas involucradas en la hidrólisis enzimática y su tolerancia a elevadas concentraciones de bioetanol (Tse *et al.*, 2021). Bajo condiciones anaeróbicas, esta levadura produce acetaldehído, que se reduce a bioetanol, lo que aumenta su rendimiento (Claassen *et al.*, 1999).

Para mejorar el desempeño de la ruta de conversión hacia bioetanol se han desarrollado diversas tecnologías para la conversión de azúcares monoméricos, entre las cuales se incluyen:

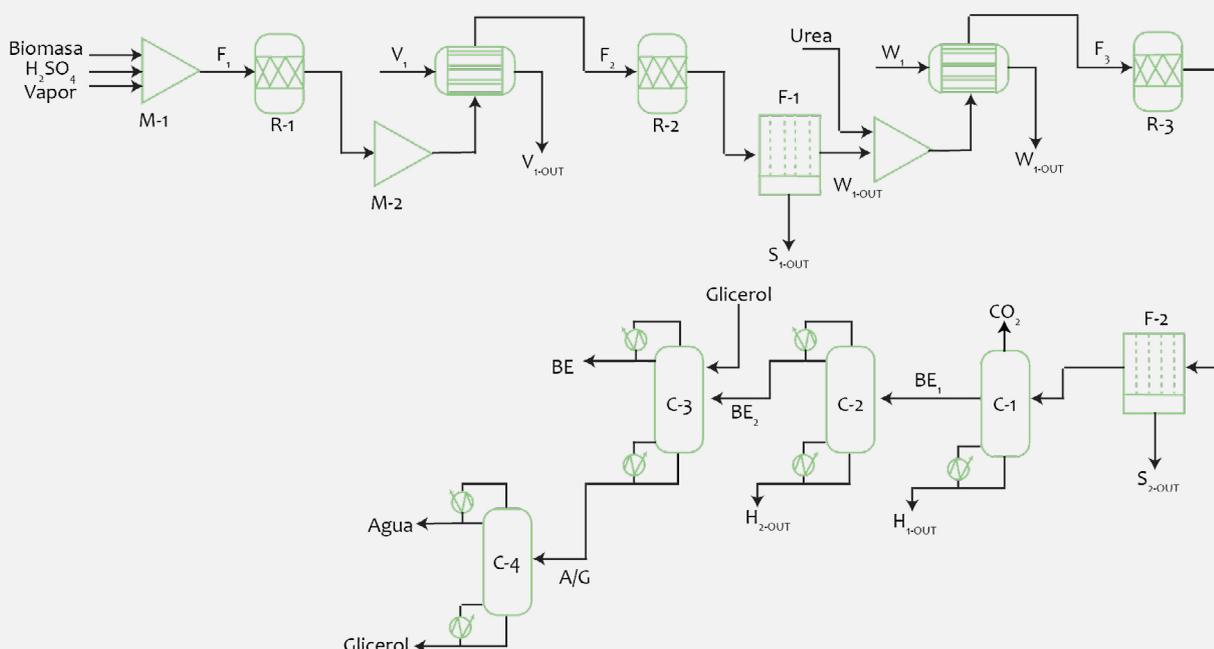
- **Hidrólisis y fermentación separadas:** La generación de enzimas, hidrólisis, y la fermentación de hexosas y pentosas se llevan a cabo en reactores individuales (Hahn-Hagerdal *et al.*, 2007).
- **Sacarificación y fermentación simultáneas:** La hidrólisis de la celulosa y la fermentación de la hexosa se realizan simultáneamente en el mismo reactor, lo que supera la inhibición de la celulosa debido al consumo instantáneo de azúcares por parte de los microorganismos fermentadores (Hahn-Hagerdal *et al.*, 2007).
- **Sacarificación y co-fermentación simultáneas:** Se utilizan dos cepas genéticamente modificadas de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* y de bacterias *Zymomonas mobilis* para co-fermentar glucosa y xilosa en el mismo reactor (Osman *et al.*, 2021).
- **Hidrólisis y co-fermentación separadas:** Integra la hidrólisis enzimática de la celulosa y la co-fermentación en un proceso simultáneo (Conde-Mejía *et al.*, 2013).

Cuando se utiliza la co-fermentación no es necesaria la separación sólido-líquido, esto permite que la mezcla de biomasa no reaccionada y los azúcares formados pueda enviarse directamente al siguiente paso. De las tecnologías mencionadas, la

hidrólisis y co-fermentación separadas es una de las mejores opciones desde el punto de vista económico (Conde-Mejía et al., 2013). Después de la conversión, se debe realizar un proceso de separación para extraer todos los productos secundarios formados y el agua del bioetanol y respecto a estos, la destilación es uno de los más utilizados debido a su capacidad para separar mezclas en grandes cantidades con alta pureza, basándose en la diferencia de los puntos de ebullición de los componentes (Kooijman y Sorensen, 2022). En la Figura 3 se muestra un ejemplo del diagrama del proceso de conversión de biomasa a bioetanol, desarrollado por Espinoza-Vázquez et al. (2023a). En este diagrama, R-1, R-2 y R-3 son los reactores de pretratamiento, hidrólisis y fermentación, respectivamente. F-1 y F-2 son separadores de sólidos para extraer la biomasa no reaccionada de los flujos de alimentación. C-1, C-2 y C-3 son las columnas de destilación para obtener bioetanol con una pureza del 99%. En los hervidores de C-1 y C-2 se eliminan los productos secundarios, dejando solo bioetanol y agua que entran a la columna C-3, donde se lleva a cabo una destilación extractiva que utiliza glicerol como agente extractante (Segovia-Hernández et al., 2014). Finalmente, la columna C-4 se encarga de recuperar el glicerol con una pureza del 99%. Este proceso tiene un CAT (Costo Total Anual) de 298,469.78 miles de dólares/año, con una carga energética de 3.95×10^9 kW/año y un costo de 2.91 dólares/kg de bioetanol.

Figura 3

Proceso de conversión de biomasa lignocelulósica en bioetanol.



Se ha propuesto la implementación de tecnologías intensificadas en los procesos de conversión de biomasa a bioetanol, destacándose entre las técnicas aplicadas las membranas para biorreactores híbridos, ultrasonidos y microondas. De acuerdo con Kumakiri *et al.* (2021), el uso de levaduras termotolerantes y tecnologías basadas en membranas ha demostrado mejorar notablemente el rendimiento del proceso de conversión de bioetanol. Por otro lado, estudios como el de Suresh *et al.* (2020) compararon la hidrólisis ácida asistida por ultrasonido con la hidrólisis enzimática en la producción de bioetanol a partir de residuos de papa. En ambos procesos, se observó una mejora en el rendimiento del bioetanol, siendo la hidrólisis ácida asistida por ultrasonidos más eficiente que la hidrólisis enzimática.

Intermediarios en el proceso de conversión de bioetanol

Durante el pretratamiento y la hidrólisis, la hemicelulosa y la celulosa se convierten en azúcares fermentables como la glucosa y la xilosa. Posteriormente, durante la fermentación, se generan componentes inhibidores, como se muestra en la Figura 4. El tipo y la cantidad de estos componentes dependen en gran medida de la materia prima y del método de pretratamiento (Jönsson y Martín, 2016). La concentración de algunos componentes puede aumentar en las etapas de conversión, mientras que otros pueden ser descompuestos por la levadura en otros productos (Conde-Mejía *et al.*, 2013), los cuales son considerados de alto valor económico, tal como se muestra en la Figura 5.

Figura 4

Rutas de conversión de biomasa.

Adaptado de Espinoza-Vázquez *et al.* (2023b).

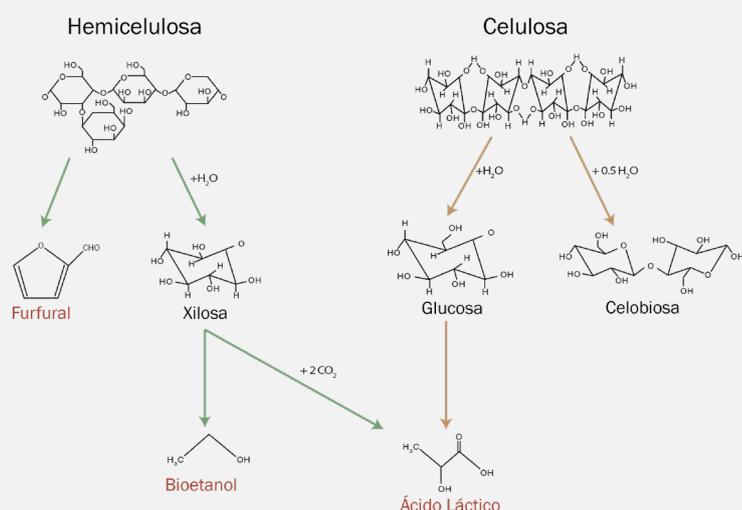
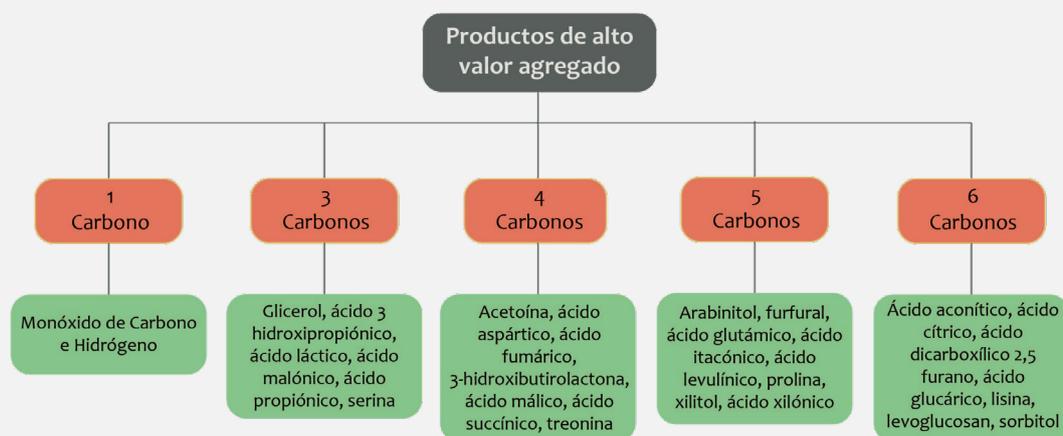


Figura 5

Top 30 productos de alto valor agregado.

(Departamento de Energía, 2004).

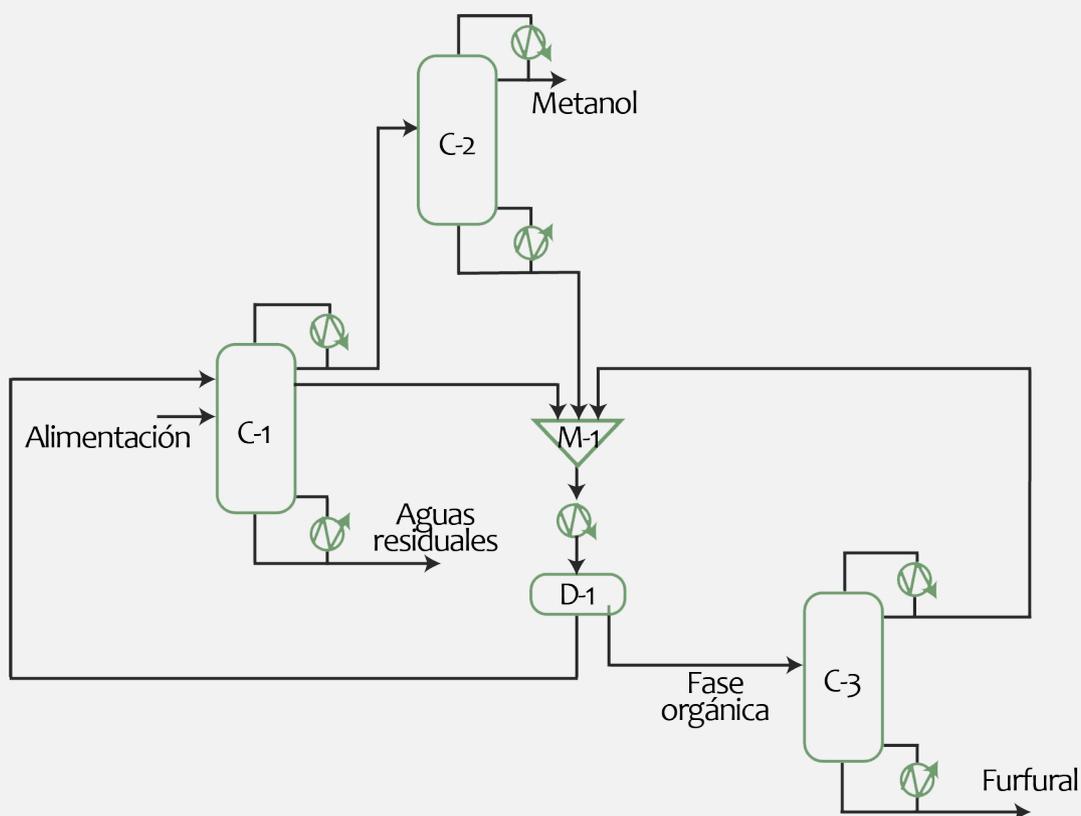


Uno de los productos de alto valor obtenidos es el furfural, el cual se utiliza comúnmente como disolvente y es soluble en etanol, éter y, en pequeñas cantidades, en agua. Por otra parte, el ácido láctico es un importante producto industrial, que se usa como precursor de componentes de pequeñas o grandes moléculas, como el glicol de propileno y polímeros de acrílicos, respectivamente. En el esquema de procesamiento mostrado en la Figura 3, por cada kilogramo de residuos de sorgo se obtienen aproximadamente 0.1 kg de furfural y 0.38 kg de ácido láctico. Estos productos intermediarios pueden someterse a un proceso de purificación para aprovecharlos y así tener la co-producción de bioetanol y bioproductos de manera simultánea.

En la actualidad, el proceso de purificación para el furfural más utilizado es la metodología de la compañía Quaker Oats, cuyo proceso se muestra en la Figura 6. Como se mencionó previamente, el proceso de conversión de biomasa a bioetanol y bioproductos conlleva una gran cantidad de agua. Debido a la formación de un azeótropo entre el agua y el furfural a bajas concentraciones, se requiere una destilación azeotrópica. Para ello, se utiliza la columna C-1 en la cual el agua arrastra al furfural a la fase gaseosa. Esta mezcla pasa a la columna C-2, donde el furfural se condensa y se forman dos fases que se envían a un decantador. La corriente rica en agua se devuelve a la columna C-1 y, en el fondo de esta misma, se eliminan otros componentes pesados. La corriente rica en furfural, sale del decantador y entra en la columna C-3, donde el furfural se purifica. Este esquema se conoce como el proceso Quaker (Dashtban *et al.*, 2012; Rachamontree *et al.*, 2020).

Figura 6

Proceso convencional de separación.

Quaker Oats (Dashtban *et al.*, 2012).

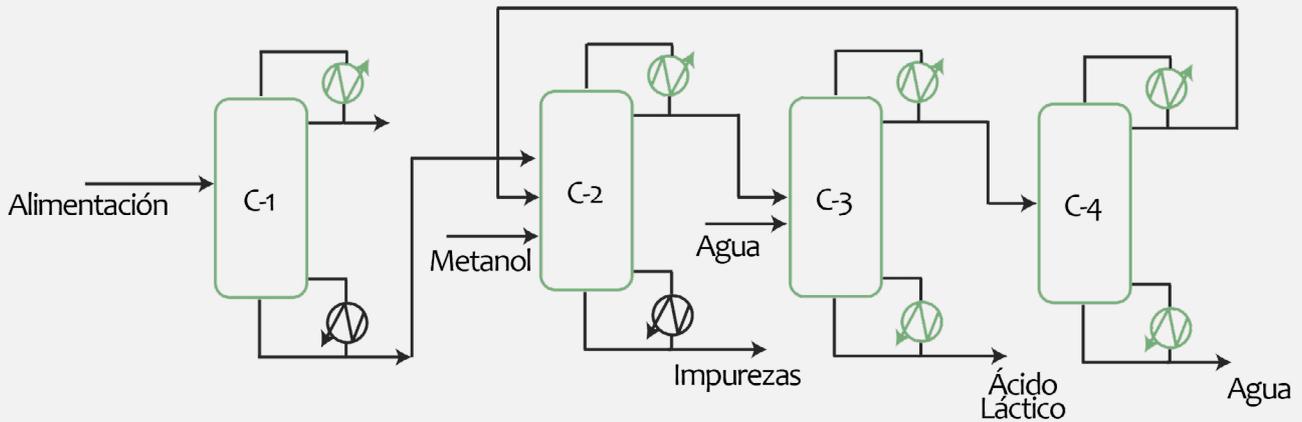
Por otra parte, para la purificación del ácido láctico se suele utilizar un esquema convencional (Kim *et al.*, 2017), representado en la Figura 7. En la primera columna, C-1, se alimenta el flujo procedente del proceso de fermentación que contiene ácido láctico, impurezas y una mayor proporción en agua; el objetivo de esta columna es eliminar la mayor cantidad posible de agua. Posteriormente, el flujo de fondo se alimenta a la columna C-2, donde se lleva a cabo una reacción de esterificación del ácido láctico con metanol, eliminando las impurezas más pesadas en la parte inferior de la columna. Después, el destilado (ácido láctico esterificado) se dirige a la columna C-3, donde se realiza una hidrólisis para obtener ácido láctico purificado, y finalmente, en la columna C-4 se purifica el metanol para ser recirculado en la columna C-2.

En los últimos años, la mayoría de los avances referentes en procesos químicos se han enfocado en la intensificación de procesos, ya que los métodos tradicionales requieren múltiples equipos, lo que resulta en altos costos, uso de espacio considerable en las instalaciones, mayores demandas energéticas, entre otras desventajas. La intensificación de procesos implica

la aplicación de principios innovadores en el diseño de procesos y equipos, ofreciendo beneficios significativos en eficiencia de proceso, cadenas de suministro, reducción de costos de capital, minimización de residuos, entre otros aspectos positivos (Dimían *et al.*, 2014).

Figura 7

Proceso convencional de separación de ácido láctico.



Entre las técnicas utilizadas para ambos procesos destacan las columnas térmicamente acopladas (TCC, por sus siglas en inglés) y las columnas con pared divisoria (DWC, por sus siglas en inglés). El principal objetivo de las TCC es eliminar un condensador o rehervidor del esquema convencional, reemplazándolo con flujos interconectados para reducir el remezclado de componentes volátiles intermedios, lo cual está asociado con ineficiencias termodinámicas en las columnas de destilación (Nhien *et al.*, 2016). Por otro lado, las DWC combinan dos columnas en una mediante una pared que se extiende hasta el fondo de la columna para obtener dos corrientes de fondo distintas (Conteras-Zarazúa *et al.*, 2018).

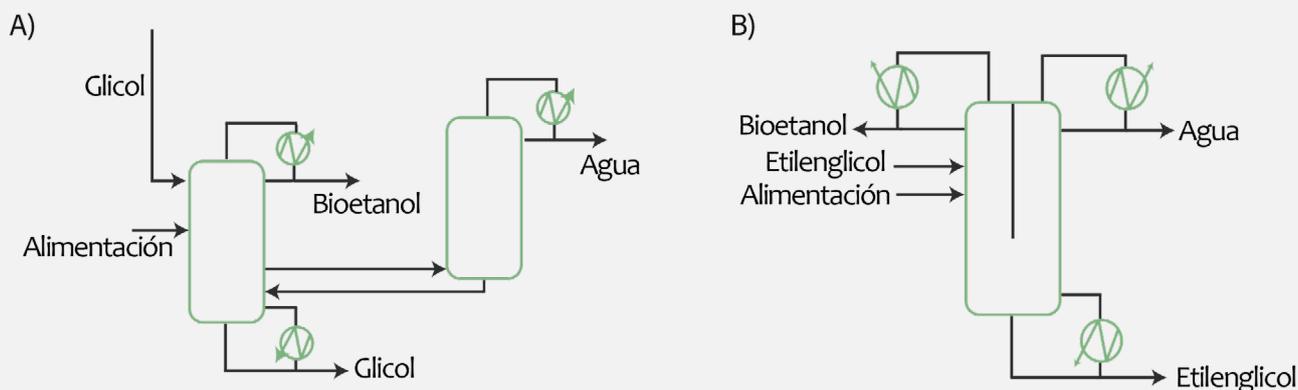
Para el caso de bioetanol, se ha propuesto el uso de las TCC, tal como muestra la Figura 8.A (Torres-Ortega *et al.*, 2009), donde una corriente de etanol diluido en agua es alimentada a una columna de destilación térmicamente acoplada a un rectificador lateral con glicol como agente extractante. Esto ha permitido una reducción de 10 kW en comparación con los esquemas extractivos convencionales. Asimismo, las DWC se han aplicado en la purificación de bioetanol, tal como muestra la Figura 8.B (Loy *et al.* 2012), con secciones superiores divididas y una sección de fondo común. Con una alimentación de agua-etanol concentrada, se separa el etanol en un lado y el

etilenglicol en el fondo, logrando un ahorro energético de hasta 10% respecto a los esquemas convencionales.

Figura 8

Esquemas intensificados de purificación de bioetanol:

A) TCC, B) DWC.



Otro estudio importante es el uso de destilación reactiva y destilación reactiva asistida por membrana, cuya aplicación fue realizada por Kumakiri *et al.* (2021), el cual se centró en una mezcla etanol/agua con un 10% en peso de etanol, con el objetivo de obtener etanol al 99.5 % en peso. El uso de membranas ayudó a deshidratar el etanol, reduciendo así los requerimientos energéticos del proceso. Los procesos intensificados de destilación y separación por membranas son prometedores y pueden reducir los costos energéticos y operativos de la separación del bioetanol (Gómez-Castro *et al.*, 2023).

Análisis económico y ambiental de la producción de furfural y ácido láctico

Existen diversos métodos para la purificación de furfural y ácido láctico, por lo cual, resulta crucial seleccionar el proceso óptimo no sólo desde una perspectiva económica, sino también ambiental. El Costo Anual Total (CAT) y el eco-indicador 99 (ECO-99) son dos métricas clave para evaluar los impactos económicos y ambientales. El CAT comprende la suma de los costos de equipos y operaciones, esto incluye servicios como vapor y electricidad (Turton *et al.*, 2008). Por otro lado, el ECO-99 es una metodología del análisis del ciclo de vida utilizada para evaluar la sostenibilidad de un proceso químico (Dreyer *et al.*, 2003). En el ECO-99, las 11 categorías de impacto se agrupan en tres categorías principales: la salud humana, calidad de los ecosistemas y agotamiento de los recursos.

Para el caso del furfural, según el estudio realizado por Contreras-Zarazúa *et al.* (2022), se muestra una comparación entre

los tipos de procesos y su análisis económico y ambiental. En la Tabla 2 se observa que el proceso convencional tiene un mayor CAT en comparación con los esquemas intensificados, aunque la reducción ambiental no es significativa. La columna térmicamente acoplada es la que muestra un mejor compromiso en términos de costo e impacto ambiental.

Tabla 2

Comparación del CAT y ECO-99 para furfural y ácido láctico.

(Contreras-Zarazúa *et al.*, 2022; González-Navarrete *et al.*, 2021).

Producto	Proceso	CAT (\$ USD/ año)	ECO-99 (puntos/año)
Furfural	Convencional	2.454×10 ⁷	1.544×10 ⁷
	TCC	1.956×10 ⁷	1.478×10 ⁷
	DWC	2.106×10 ⁷	1.492×10 ⁷
	Convencional	1.274×10 ⁶	405 025
Ácido Láctico	TCC	1.134×10 ⁶	376 834
	DWC	1.062×10 ⁶	303 062

En cuanto a la producción de ácido láctico, los principales resultados del estudio de González-Navarrete *et al.* (2021) se presentan en la Tabla 2. Se observa un comportamiento similar entre los esquemas convencionales e intensificados, sin embargo, el esquema con pared divisoria exhibe un mejor compromiso tanto en términos de costo como de impacto ambiental para este producto.

Después de analizar el TAC y el ECO-99 para la producción de estos bioproductos, es crucial mantener el enfoque en el objetivo principal de este análisis: incorporar estos procesos al esquema general de producción de bioetanol. Es fundamental aprovechar los productos formados como intermediarios, por ejemplo, del proceso mostrado en la Figura 3, integrando los esquemas mencionados previamente para la recuperación y purificación del furfural y ácido láctico presentes en la corriente “H₁ Out”. La integración de la intensificación de procesos puede mejorar significativamente la rentabilidad económica y ambiental del esquema de biorrefinería. Es esencial también considerar el tamaño del mercado para ambos bioproductos: para el furfural se reporta un precio de venta de 3.15-3.5 \$ USD/kg (Made in China, 2023), con expectativas de crecimiento para el 2028. Mientras tanto, el ácido láctico tiene un precio

de venta de 2.5 \$ USD/kg, y el mercado global se estima en 1,628 billones de dólares (QuimiNet, 2023).

Resumen y perspectivas

La sustitución parcial de la gasolina por bioetanol se presenta como una medida efectiva en ascenso, pero su producción y distribución se ven limitadas por la rentabilidad comparada con los combustibles fósiles. Por ende, es crucial integrar los procesos analizados en el esquema completo de producción de bioetanol para un análisis detallado en una biorrefinería. Además, establecer diseños de cadenas de suministro efectivas es clave, pues la viabilidad del esquema de biomasa depende tanto de la eficiencia del proceso como de la adecuación de la cadena de producción y distribución. Es imperativo desarrollar esquemas integrales de aprovechamiento de biomasa que maximicen la producción de derivados y mantengan la viabilidad económica a través la selección adecuada de rutas de conversión, implementación de tecnologías avanzadas y estrategias de cadena de suministro óptimas en términos económicos, ambientales y sociales.

Conclusiones

En este estudio se han revisado y analizado diversas propuestas para el procesamiento y purificación de bioetanol, así como de bioproductos de alto valor agregado como el furfural y el ácido láctico. En términos generales, se concluye que los procesos intensificados para la purificación de los co-productos derivados en la conversión de biomasa a bioetanol pueden facilitar la creación de esquemas de biorrefinería técnicamente sólidos y económicamente viables. Específicamente, se encontró que los esquemas enfocados en columnas térmicamente acopladas para la purificación de furfural pueden reducir el costo de capital del proceso en un 20 % y su impacto ambiental en un 4 %. En el caso del ácido láctico, las columnas con pared divisoria mostraron ser la opción más favorable, disminuyendo el costo de capital en un 16 %. En resumen, la integración de procesos de purificación de co-productos en la cadena de conversión de biomasa a bioetanol puede jugar un papel crucial en el desarrollo de biorrefinerías sostenibles.

Referencias

Bandyopadhyay-Ghosh, S., Ghosh, S. B., y Sain, M. (2015). The use of biobased nanofibres in composites. En *Biofiber rein-*

- forcements in composite materials*, 571–647. <https://doi.org/10.1533/9781782421276.5.571>
- Claassen, P., Van Lier, J., López Contreras, A., Van Niel, E., Sijtsma, L., Stams, A., De Vries, S., y Weusthuis, R. (1999). Utilisation of biomass for the supply of energy carriers. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 52, 741–755. <https://doi.org/10.1007/s002530051586>
- Conde-Mejía, C., Jiménez-Gutiérrez, A., y M. El-Halwagi., M. (2013). Assessment of combinations between pretreatment and conversion configurations for bioethanol production. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 1(8), 956–965. <https://doi.org/10.1021/sc4000384>
- Conde-Mejía, C., Jiménez-Gutiérrez, A., y El-Halwagi, M. (2012). A comparison of pretreatment methods for bioethanol production from lignocellulosic materials. *Process Safety and Environmental Protection*, 90, 189–202. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2011.08.004>
- Contreras-Zarazúa, G., Martín-Martín, M., Sánchez-Ramírez, E., y Segovia-Hernández, J. G. (2022). Furfural production from agricultural residues using different intensified separation and pretreatment alternatives. Economic and environmental assessment. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 171. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108569>
- Contreras-Zarazúa, G., Sánchez-Ramírez, E., Vázquez-Castillo, J. A., Ponce-Ortega, J. M., Errico, M., Kiss, A. A., y Segovia-Hernández, J. G. (2018). Inherently safer design and optimization of intensified separation processes for furfural production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(15), 6105–6120. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b03646>
- Damián-Huato, M. A., Cruz-León, A., Ramírez-Valverde, B., Romero-Arenas, O., Moreno-Limón, S., y Reyes-Muro, L. (2013). Maíz, alimentación y productividad: modelo tecnológico para productores de temporal de México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 10(2), 157–176. <https://www.scielo.org.mx/pdf/asd/v10n2/v10n2a2.pdf>
- Dashtban, M., Gilbert, A., y Fatehi, P. (2012). Production of furfural: overview and challenges. *Journal of Science & Technology for Forest Products and Processes*, 2(4), 44–53.
- Departamento de Energía (10 de noviembre del 2023). *Biofuel basic*. <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/biofuel-basics>
- Dimían, A. C., Bildea, C. S., y Kiss, A. A. (2014). Process intensification. *Computer Aided Chemical Engineering*, 35, 397–448. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62700-1.00010-3>
- Dreyer, L. C., Niemann, A. L., y Hauschild, M. Z. (2003). Comparison of three different LCIA methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99: Does it matter which one you choose? *The International Journal*

- of *Life Cycle Assessment*, 8(4), 191–200. <https://doi.org/10.1007/BF02978471>
- Espinoza-Vázquez, Y. M., Gómez-Castro, F. I., Sánchez-Ramírez, E., y Romero-Izquierdo, A. G. (2023a). Development and assessment of intensification alternatives on the lignocellulosic bioethanol production process. *Computer Aided Chemical Engineering*, 52, 2735–2740. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15274-0.50435-2>
- Espinoza-Vázquez, Y. M., Hernández-Camacho, N. V., y Gómez-Castro, F. I. (2023b). Agricultural Residues as Raw Materials for a Bio-based Industry. En *Sustainable Agricultural Practices and Product Design* (pp. 77–99). American Chemical Society.
- Garrote, G., Dominguez, H y Parajó, J. (1999). Hydrothermal processing of lignocellulosic materials. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 57(3), 191–202.
- Gómez-Castro, F. I., Segovia-Hernández, J. G., Rodríguez, R. M., & Mejía, C. C. (2023). Advances and challenges in the production and purification of bioethanol using intensified processes. En *Bioethanol Fuel Production Processes*. II, 426–436.
- González-Navarrete, C., Sánchez-Ramírez, E., Ramírez-Márquez, C., Hernández, S., Cossío-Vargas, E., y Segovia-Hernández, J. G. (2021). Innovative reactive distillation process for the sustainable purification of lactic acid. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61(1), 621–637. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c04050>
- Hahn-Hägerdal, B., Karkumaa, K., Fonseca, C., Spencer-Martins, I., y Gorwa-Grauslund, M. F. (2007). Towards industrial pentose-fermenting yeast strains. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 74, 937–953. <https://doi.org/10.1007/s00253-006-0827-2>
- Hong, B., Xue, G., Weng, L., y Guo, X. (2012). Pretreatment of moso bamboo with dilute phosphoric acid. *BioResources*, 7(4), 4902–4913. <https://doaj.org/article/3075a807a4c3478591d3227b003c-fegb>
- Jönsson, L. J. y Martín, C. (2016). Pretreatment of lignocellulose: formation of inhibitory by-products and strategies for minimizing their effects. *Bioresource Technology*, 199, 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.009>
- Kim, S. Y., Kim, D. M., y Lee, B. (2017). Process simulation for the recovery of lactic acid using thermally coupled distillation columns to mitigate the remixing effect. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 34, 1310–1318. <https://doi.org/10.1007/s11814-017-0009-1>
- Kooijman, H. A. y Sorensen, E. (2022). Recent advances and future perspectives on more sustainable and energy efficient distillation processes. *Chemical Engineering Research and Design*, 188(11), 473–482 <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.10.005>

- Kumar, P., Barrett, D. M., Delwiche, M. J., y Stroeve, P. (2009). Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(8), 3713–3729. <https://doi.org/10.1021/ie801542g>
- Kumakiri, I., Yokota, M., Tanaka, R., Shimada, Y., Kiatkittipong, W., Lim, J. W., Murata, M. y Yamada, M. (2021). Process intensification in bio-ethanol production—Recent developments in membrane separation. *Processes*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/pr9061028>
- Law Corner (10 de noviembre del 2023). *Stubble burning – A trouble to the environment*. <https://lawcorner.in/stubble-burning-a-trouble-to-the-environment/>
- Loy, Y., Lee, X., y Rangaiah, G. (2015). Bioethanol recovery and purification using extractive dividing-wall column and pressure swing adsorption: An economic comparison after heat integration and optimization. *Separation and Purification Technology*, 149, 413–427. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.06.007>
- Lutze, P., Babi, D. K., Woodley, J. M., & Gani, R. (2013). Phenomena based methodology for process synthesis incorporating process intensification. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(22), 7127–7144. <https://doi.org/10.1021/ie302513y>
- Made in China (2023). *Furfural Price*. https://www.made-in-china.com/products-search/hot-china-products/Furfural_Price.html
- Mankar, A. R., Pandey, A., Modak, A., y Pant, K. (2021). Pretreatment of lignocellulosic biomass: A review on recent advances. *Bioresource Technology*, 334. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125235>
- Nhien, L. C., Long, N. V. D., Kim, S., y Lee, M. (2016). Design and assessment of hybrid purification processes through a systematic solvent screening for the production of levulinic acid from lignocellulosic biomass. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55(18), 5180–5189. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b04519>
- O’Connell, D., Batten, D., O’Connor, M., May, B., Raison, J., Keating, B., Beer, T., Braid, A., Haritos, V., Begley, C., Poole, M., Poulton, P., Graham, S., Dunlop, M., Grant, T., Campbell, P. y Lamb, D. (2007). *Biofuels in Australia - Issues and Prospects: A Report for the Rural Industries Research and Development Corporation*. Rural Industries Research and Development Corporation.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (10 de noviembre del 2023). *Crops and livestock products*. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- Osman, A. I., Mehta, N., Elgarahy, A. M., Al-Hinai, A., Muhtaseb, A. H., y Ronney, D. W. (2021). Conversion of biomass to biofuels and life cycle assessment: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(6), 4075–4118. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01273-0>

- QuimiNet (2023). *Lactic Acid Price*. https://www.quiminet.com/principal/resultados_busqueda.php?N=Lactic+acid&d=P
- Rachamontree, P., Douzou, T., Cheenkachorn, K., Sriariyanun, M., y Rattanaporn, K. (2020). Furfural: A sustainable platform chemical and fuel. *Applied Science and Engineering Progress*, 13(1), 3–10. <https://pho2.tci-thaijo.org/index.php/ijast/article/view/239991>
- Reboredo, F. H., Lidon, F. C., Ramalho, J. C., y Pessoa, M. F. (2017). The forgotten implications of low oil prices on biofuels. *Bioproducts and Biorefining*, 11(4), 625–632. <https://doi.org/10.1002/bbb.1769>
- Ritchie, H., Roser, M., y Rosado, P. (2022). *Energy, Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/energy>
- Saini, J. K., Saini, R., y Tewari, L. (2015). Lignocellulosic agriculture wastes as biomass feedstocks for second-generation bioethanol production: concepts and recent developments. *3 Biotech*, 5, 337–353. <https://doi.org/10.1007/s13205-014-0246-5>
- Segovia-Hernández, J. G., Vázquez-Ojeda, M., Gómez-Castro, F., Ramírez-Márquez, C., Errico, M., Tronci, S., y Rong, B.G. (2014). Process control analysis for intensified bioethanol separation systems. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 75, 119–125. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2013.11.002>
- Senatore, A., Dalena, F., y Basile, A. (2020). Novel bioethanol production processes and purification technology using membranes. En *Studies in Surface Science and Catalysis* (pp. 359–384). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64337-7.00019-7>
- Shah, A. A., Seehar, T. H., Sharma, K., y Toor, S. S. (2022). Biomass pretreatment technologies. *Hydrocarbon Biorefinery*, 203–228. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823306-1.00014-5>
- Shrotri, A., Kobayashi, H., y Fukuoka, A. (2017). Catalytic conversion of structural carbohydrates and lignin to chemicals. *Advances in Catalysis*, 60, 59–123. <https://doi.org/10.1016/bs.acat.2017.09.002>
- Suresh, T., Sivarajasekar, N., Balasubramani, K., Ahamad, T., Alam, M., y Naushad, M. (2020). Process intensification and comparison of bioethanol production from food industry waste (potatoes) by ultrasonic assisted acid hydrolysis and enzymatic hydrolysis: Statistical modelling and optimization. *Biomass and Bioenergy*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105752>
- Talebna, F., Karakashev, D., y Angelidaki, I. (2010). Production of bioethanol from wheat straw: an overview on pretreatment, hydrolysis and fermentation. *Bioresource Technology*, 101(13), 4744–4753. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.080>
- Tan, L., Tang, Y.-Q., Nishimura, H., Takei, S., Morimura, S., y Kida, K. (2013). Efficient production of bioethanol from corn stover by pretreatment with a combination of sulfuric acid and sodium hydroxide.

Preparative Biochemistry and Biotechnology, 43(7), 682–695. <https://doi.org/10.1080/10826068.2013.773338>

- Torres-Ortega, C. E., Segovia-Hernández, J. G., Hernández, S., Hernández, H., Bonilla-Petriciolet, A., y Maya-Yescas, R. (2009). Design and optimization of thermally coupled distillation sequences for purification of bioethanol. *Computer Aided Chemical Engineering*, 27(1), 957–962. [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(09\)70380-3](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(09)70380-3)
- Tse, T. J., Wiens, D. J., Shen, J., Beattie, A. D., y Reaney, M. J. (2021). *Saccharomyces cerevisiae* fermentation of 28 barley and 12 oat cultivars. *Fermentation*, 7(2). <https://doi.org/10.3390/fermentation7020059>
- Turton, R., Bailie, R. C., Whiting, W. B., Shaeiwitz, J. A. y Bhattacharyya, D. (2008). *Analysis, synthesis and design of chemical processes*. Pearson Education.
- Wingren, A., Galbe, M., y Zacchi, G. (2003). Techno-economic evaluation of producing ethanol from softwood: Comparison of SSF and SHF and identification of bottlenecks. *Biotechnology Progress*, 19(4), 1109–1117. <https://doi.org/10.1021/bp034018o>

Harinas instantáneas: ingrediente versátil para una alimentación rápida y nutritiva

Instant flours: versatile ingredient for a quick and nutritious meal

Teresita Arredondo-Ochoa

Amira Calvo-López*

Eduardo Morales-Sánchez

Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Querétaro, México

Marcela Gaytán-Martínez

Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México

* camd_86@outlook.com

Fecha de recepción: 26 de agosto del 2024

Fecha de aceptación: 2 de diciembre del 2024

Resumen

Históricamente, las harinas instantáneas fueron la respuesta a la necesidad de materias primas para obtener alimentos básicos, como el pan y la tortilla, entre otros. Su producción se ha refinado para lograr mantener y maximizar el valor nutricional de los ingredientes originales, tales como cereales y leguminosas, etcétera. El propósito primordial de este estudio es examinar la evolución de las harinas instantáneas con el fin de satisfacer la demanda de estos ingredientes fundamentales para la elaboración de alimentos nutritivos y adecuados al estilo de vida contemporáneo. Se examinará su origen histórico, los diversos procesos de fabricación y sus aplicaciones presentes y futuras, subrayando la importancia de las harinas instantáneas no solo en la nutrición básica, sino también en la generación de alimentos funcionales, garantizando un papel preponderante en la concepción de productos alimenticios.

Palabras clave: harinas instantáneas, alimentos precocidos, alimentos nutritivos

Abstract

Historically, instant flours were the response to the need for raw materials to produce basic foods, such as bread and tortillas, among others. Their production has been refined to maintain



and maximize the nutritional value of the original ingredients, for example cereals, legumes and others. The primary aim of this study is to examine the evolution of instant flours in order to meet the demand for these fundamental ingredients for the production of nutritious foods suitable for contemporary lifestyles. Its historical origin, the various manufacturing processes and its present and future applications will be examined, underlining the importance of instant flours not only in basic nutrition, but also in the generation of functional foods, ensuring a leading role in the design of food products.

Keywords: flours instant flours, precooked foods, nutritional foods

Introducción

En la acelerada rutina diaria, donde el tiempo se convierte en un recurso preciado, la búsqueda de opciones alimenticias convenientes y nutritivas que se adapten al estilo de vida moderno del consumidor se vuelve cada vez más relevante. En este contexto, las harinas instantáneas emergen como una solución versátil que ha ganado popularidad en la cocina moderna, este ingrediente, que van más allá de su papel convencional en la preparación de productos de panificación, ofrecen una alternativa que combina la rapidez, versatilidad y valor nutricional en un alimento. Pero antes de viajar en el tiempo dejemos en claro algo: ¿Qué entendemos por harinas instantáneas? Según Potter y Hotchkiss (1998), el término “harinas instantáneas” (Figura 1) se refiere a aquellas harinas pregelatinizadas o precocidas que pueden disolverse rápidamente en cualquier tipo de líquido, como agua o leche, facilitando su rápida preparación para ser utilizadas como ingrediente principal o como un aditivo para la formulación de un alimento.

Los objetivos principales de esta investigación son analizar los avances en los procesos de obtención de harinas instantáneas y evaluar su impacto en el mejoramiento del perfil nutricional de alimentos, desentrañar sus orígenes, su proceso de producción e incluso su papel en la promoción de una alimentación equilibrada y adaptada a nuestro estilo de vida moderno con fuentes distintas al trigo y maíz. Algunos ejemplos de estas últimas son las leguminosas que proporcionan opciones a los consumidores con las que no contaban en el pasado, lo que permite optimizar la calidad proteica y enriquecer el contenido de nutrientes en alimentos listos para consumir.

Figura 1

Harinas instantáneas.



Un avance revolucionario

La historia de las harinas instantáneas refleja la constante búsqueda de soluciones alimentarias que se adapten a la evolución de la sociedad y sus necesidades cambiantes. Su origen se encuentra entrelazado con la Revolución Industrial del siglo XIX, cuando la necesidad de alimentos rápidos coincidió con el desarrollo de la harina leudante utilizada principalmente para hacer repostería, pues se complementa con agentes leudantes, como el bicarbonato de sodio y el polvo de hornear, que producen gas cuando se mezclan con ingredientes húmedos y se exponen al calor del horno. Este gas atrapado en la masa permite que se expanda y se vuelva más esponjosa durante el horneado, creando un producto final más ligero y aireado (Zhou *et al.*, 2014).

En la Segunda Guerra Mundial, durante la década de 1930, la necesidad de alimentos no perecederos y de fácil preparación impulsó el desarrollo de harinas instantáneas para uso militar, convirtiéndose en una solución práctica para alimentar a las tropas en el campo de batalla (Collingham, 2012). El cambio de paradigma en la década de 1950, con el auge de la cultura de la comida rápida, vio cómo las harinas instantáneas comenzaron a ganar popularidad, pues las empresas alimentarias introdujeron mezclas para pan y pasteles que requerían sólo la adición de líquidos transformando la manera

en que las personas preparaban los alimentos (Rubel, 2011). Los años setenta marcaron una era de especialización con las harinas instantáneas expandiéndose más allá de los productos horneados hacia mezclas para sopas y salsas, gracias a los avances en tecnologías de extrusión y deshidratación (Matz 1972). Hoy en día, la innovación en la producción de harinas instantáneas ha experimentado una diversificación significativa con un enfoque creciente en la mejora de perfiles nutricionales con el objetivo de satisfacer las demandas de una sociedad cada vez más ocupada.

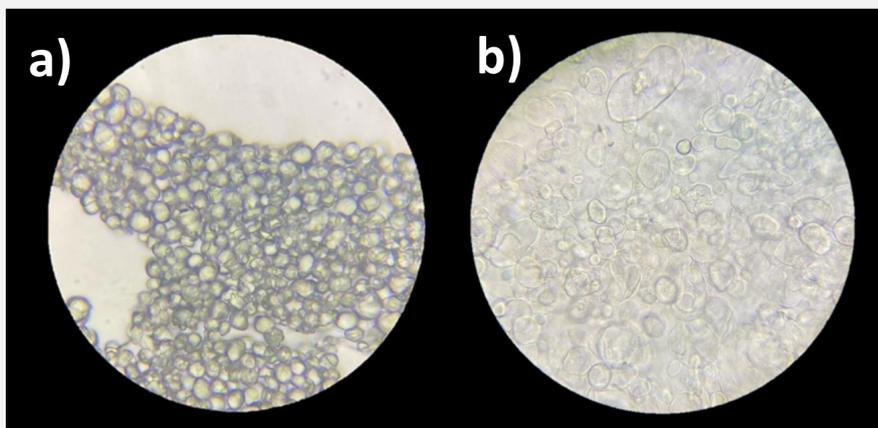
Numerosas investigaciones han mostrado cómo las harinas instantáneas son capaces de mejorar el perfil nutricional de los productos alimenticios en los que se incorporan. Por ejemplo, Atukuri *et al.* (2019) demostraron que las harinas instantáneas de amaranto producidas por extrusión constituyen una alternativa viable para una dieta complementaria, caracterizadas por un alto contenido de lisina, un aminoácido esencial que a menudo se encuentra limitado en dietas basadas en cereales. Por su parte, Ramírez-Jiménez *et al.* (2019) llevaron a cabo un estudio de las harinas instantáneas de maíz resultantes del calentamiento óhmico y observaron un incremento en la presencia de compuestos fenólicos, que cumplen una función antioxidante, y una reducción de factores antinutricios. Estos hallazgos subrayan que las harinas instantáneas no solo ofrecen celeridad y comodidad, sino que también mejoran el perfil nutricional de los productos finales, volviéndolos más aptos para dietas equilibradas y funcionales.

La magia detrás de la instantaneidad

Aunque el proceso general en su obtención varía según el tipo de harina instantánea, la característica principal radica en un proceso de cocción seguido de una deshidratación o secado. Esta cocción afecta directamente a los gránulos de almidón (Figura 2), uno de los principales constituyentes de la harina, que al absorber agua provoca que se hinchen o se rompan, lo que permite la gelatinización del almidón y lo vuelve más soluble en agua para lograr una harina que requiera menos tiempo de cocción (Chakraborty *et al.*, 2022). Además, las proteínas se desnaturalizan y se vuelven más digeribles (Xiaoxue *et al.*, 2022).

Figura 2

Gránulos de almidón de maíz nativo (a), gránulos de almidón de maíz pregelatinizado (b).



Fuente: elaboración propia.

Obtención de harinas instantáneas

La obtención de harinas instantáneas implica el uso de procesos tecnológicos específicos que permiten la rápida cocción y secado de los granos o cereales para convertirlos en harina lista para su consumo con mínima preparación adicional. Estas técnicas no solo optimizan los procesos de producción, también aseguran la conservación de las cualidades nutricionales y organolépticas de los ingredientes base. Algunas de las técnicas implicadas en la obtención de harinas instantáneas incluyen la extrusión (Pismag *et al.*, 2024), el tostado (Hatamian *et al.*, 2020), la micronización (Deepa & Hebbar, 2017), el calentamiento por microondas (Martínez-Bustos *et al.*, 2000) y el calentamiento óhmico (Ramírez-Jiménez *et al.*, 2019; Domínguez-Hernández *et al.*, 2022) (Tabla 1).

- 1) **Extrusión:** es un proceso de cocción donde la mezcla de harina y agua se somete a condiciones de alta presión y temperatura a través de una máquina extrusora. Este método crea una textura específica y deshidrata la mezcla, produciendo harinas instantáneas que se rehidratan fácilmente al entrar en contacto con líquidos durante su preparación.
- 2) **Tostado o torrefacción:** después de moler los granos, la harina puede ser tostada o torrefactada para mejorar su sabor, aroma y propiedades nutricionales. El tostado también puede ayudar a eliminar la humedad y prolongar la vida útil de la harina.
- 3) **Micronización:** la mezcla se introduce en un molino de impacto o en un molino clasificador de aire donde se produce la micronización por el choque de las partículas debido a un flujo

de aire de alta presión que pulveriza las partículas a tamaños micrométricos. Este proceso ofrece varias ventajas, las cuales incluyen una mayor solubilidad y rápida rehidratación de la harina durante la preparación de alimentos, pues al reducir el tamaño de partícula se aumenta la superficie de contacto de la harina, lo que puede mejorar la absorción de líquidos y facilitar su uso en diversas aplicaciones.

- 4) **Calentamiento por microondas:** en este proceso la mezcla se somete a un calentamiento por microondas causado por la fricción molecular de dipolos eléctricos bajo un campo eléctrico oscilante de frecuencia específica. Por tanto, la alta absorción de energía de microondas por las moléculas de agua, resulta en el calentamiento de la mezcla y la posterior obtención de la harina instantánea. El uso de calentamiento por microondas ofrece eficiencia, rapidez y bajo costo de operación para la obtención de harinas instantáneas. Como se mencionó anteriormente, este mecanismo genera calor desde el interior del producto hacia el exterior (calentamiento volumétrico), lo que reduce considerablemente las pérdidas energéticas asociadas a la transferencia de calor en técnicas convencionales y se ve reflejado en el uso de la energía de manera más eficiente. A diferencia de métodos tradicionales como el horneado o el calentamiento por conducción, las microondas son capaces de calentar los materiales en cuestión de minutos o incluso segundos, al tener tiempos de cocción cortos es posible una mayor capacidad de procesamiento y se minimiza la exposición del alimento al calor prolongado, esto ayuda a conservar sus propiedades funcionales y nutrimentales.
- 5) **Calentamiento óhmico:** la mezcla se somete a un campo eléctrico utilizando electrodos y permitiendo que la corriente eléctrica fluye a través de la mezcla para generar calor directamente en el material por disipación de la energía como en una resistencia eléctrica. El calentamiento óhmico es un proceso que ofrece ventajas en términos de eficiencia energética y control preciso de la temperatura en comparación con métodos de calentamiento indirecto como la conducción o la convección. Sin embargo, su aplicación específica en la obtención de harinas instantáneas puede depender de diversos factores, incluyendo la materia prima a partir de la cual se elabore la harina y las características deseadas del producto final.

Tabla 1

Técnicas implicadas en la obtención de harinas instantáneas.

Autores	Proceso	Objetivo
Ruiz <i>et al.</i> (2022).	Extrusión	Obtención de harinas instantáneas funcionales a base de un subproducto de sésamo con propiedades tecno-funcionales, nutricionales y antioxidante mejoradas.
Otondi <i>et al.</i> (2020).	Extrusión	Desarrollo de harinas instantáneas para papillas a base de yuca fortificadas con semillas de chía mediante extrusión.
Atukuri <i>et al.</i> (2019).	Extrusión	Obtención de harinas instantáneas de amaranto para alimentación complementaria.
Ozolina <i>et al.</i> (2024).	Tostado	Determinación de las propiedades funcionales de harinas instantáneas de habas y lentejas crudas y tostadas
Byarugaba <i>et al.</i> (2023).	Tostado	Determinación de las propiedades químicas y funcionales de harinas instantáneas de frijol.
Ranganathan <i>et al.</i> (2014).	Tostado	Desarrollo de harinas instantáneas a base de sorgo con propiedades funcionales.
Deepa & Hebbar (2017).	Micronización	Obtención de harinas instantáneas de maíz con valor agregado.
Laudadio <i>et al.</i> (2013).	Micronización	Producción de harinas instantáneas de girasol reducidas en fibra.
Sun <i>et al.</i> (2006).	Micronización	Determinación de las propiedades nutricionales, fisicoquímicas y reológicas de harinas de trigo.
An <i>et al.</i> (2023).	Microondas	Evaluación de las propiedades estructurales, térmicas, funcionales y reológicas de harinas de maíz.
Mahalaxmi y <i>et al.</i> (2022).	Microondas	Evaluación del perfil proteico y las propiedades funcionales de harinas de lenteja.
Madaraboina <i>et al.</i> (2021).	Microondas	Determinación de las propiedades físicas y funcionales de harinas de mijo.
Ramírez-Jiménez <i>et al.</i> (2019).	Calentamiento óhmico	Evaluación del perfil de fitoquímicos de harinas de maíz instantáneas.

Versatilidad para el consumidor

La versatilidad culinaria de las harinas instantáneas es otro factor que contribuye a su creciente popularidad. Dado que pueden ser utilizadas para crear una amplia variedad de platillos, resultan una opción atractiva tanto para aquellos que buscan comidas rápidas y simples como para quienes desean explorar nuevas posibilidades culinarias (Figura 3). Aunque la composición específica puede variar según el tipo de harina instantánea, a menudo están elaboradas a partir de granos como el maíz, trigo, avena, arroz, hasta leguminosas (garbanzos o lentejas) y vegetales (espinacas o brócoli), por mencionar algunos; pro-

porcionando una variedad de opciones nutricionales y de sabor para personas que son intolerantes o alérgicas a ciertos ingredientes. En algunos casos las harinas instantáneas pueden ser adicionadas con agentes leudantes y otros aditivos como los emulsionantes (la lecitina de soja o los mono y diglicéridos de ácidos grasos que ayudan a estabilizar y mantener uniforme la mezcla de ingredientes de la harina); espesantes (goma guar, goma xantana y carragenina), para mejorar la textura; además de saborizantes y colorantes.

Figura. 3

Alimentos a base de harinas instantáneas.



Por otro lado, algunas harinas instantáneas permiten ser fortificadas mediante la incorporación de vitaminas y minerales (hierro, calcio, vitamina D), con el objetivo de mejorar su perfil nutrimental y volverlas atractivas para un grupo específico de consumidores (Cardoso *et al.*, 2019). Desde el punto de vista nutricional, muchas harinas instantáneas están diseñadas para ser enriquecidas con proteínas, fibras y otros nutrientes que contribuyan a una alimentación equilibrada y saludable. Además, la inclusión de ingredientes naturales y la reducción de aditivos artificiales son aspectos clave que respaldan la calidad nutrimental de estas opciones alimentarias; inclusive se han desarrollado productos adaptados a diferentes preferencias

dietéticas, como harinas sin gluten, bajas en carbohidratos o enriquecidas con nutrientes adicionales (Vázquez-Ovando *et al.*, 2009). A medida que la conciencia sobre la importancia de una alimentación saludable continúa creciendo, las harinas instantáneas se presentan como una opción para la preparación de ciertos alimentos (panes, pastas) o para ser utilizadas como aditivo alimentario al actuar como espesante, brindando una solución atractiva para aquellos que buscan opciones convenientes sin sacrificar la salud.

¿Por qué las harinas instantáneas son nutritivas?

Las harinas instantáneas pueden ser catalogadas como nutritivas dado que en sus procesos de elaboración se preserva y optimiza el valor nutricional de los alimentos. Por ejemplo, la aplicación de calentamiento óhmico a las harinas de maíz potencia la concentración de compuestos fenólicos con características antioxidantes y disminuye los compuestos que obstruyen la digestión de proteínas (Ramírez-Jiménez *et al.*, 2019). Por otro lado, la extrusión también optimiza el contenido de lisina en las harinas de amaranto, un aminoácido restringido en los cereales, mejorando así el perfil proteico para una alimentación complementaria (Atukuri *et al.*, 2019). Adicionalmente, estos procedimientos facilitan la conservación de compuestos bioactivos y vitaminas, tal como se evidencia en las harinas fortificadas con hierro y calcio, lo que las convierte en un instrumento eficaz para tratar deficiencias nutricionales (Cardoso *et al.*, 2019; Ruiz-Armenta *et al.*, 2022). Finalmente, la incorporación de cereales y leguminosas en las fórmulas optimiza notablemente la calidad proteica al equilibrar el perfil de aminoácidos (Byarugaba *et al.*, 2023; Domínguez-Hernández *et al.*, 2022). Estas propiedades confieren a las harinas instantáneas una versatilidad, accesibilidad y sostenibilidad para cumplir con las demandas nutricionales de diversas poblaciones, desde alimentos sin gluten hasta productos enriquecidos con proteínas y fibras.

Conclusiones

Las necesidades y preferencias de los consumidores han ido cambiando con el paso del tiempo, hoy es imprescindible desarrollar productos específicos y considerar las necesidades dietéticas individuales. En este contexto, las harinas instantáneas representan una prometedora alternativa en el ámbito de la alimentación rápida y nutritiva. Su versatilidad permite adaptarse a diversos grupos poblacionales, lo que las convierte

en ingredientes clave para abordar deficiencias específicas en poblaciones vulnerables. Su rápida preparación y alta biodisponibilidad de nutrientes las hacen ideales para incluir en alimentos funcionales diseñados para satisfacer las necesidades de un estilo de vida moderno sin comprometer la calidad nutrimental.

Referencias

- Atukuri, J., Odong, B. B., & Muyonga, J. H. (2019). Multi-response optimization of extrusion conditions of grain amaranth flour by response surface methodology. *Food Science & Nutrition*, 7(12), 4147–4162. [10.1002/fsn3.1284](https://doi.org/10.1002/fsn3.1284).
- Byarugaba, R., Nabubuya, A., Muyonga, J., & Mwakha, A. (2023). Effects of roasting conditions on the proximate composition and functional properties of common bean (*Phaseolus vulgaris*) flours. *Tanzania Journal of Science*, 49(2), 546–558. [10.4314/tjs.v49i2.23](https://doi.org/10.4314/tjs.v49i2.23).
- Cardoso, R. V. C., Fernandes, A., González-Paramas, A. M., Barros, L., & Ferreira, I. C. F. R. (2019). Flour fortification for nutritional and health improvement: A review. *Food Research International*, 125. [10.1016/j.foodres.2019.108576](https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108576)
- Collingham, L. (2012). *Taste of war: World War II and the battle for food*. Penguin.
- Deepa, C., & Umesh Hebbar, H. (2017). Effect of micronization of maize grains on shelf-life of flour. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(5). [10.1111/jfpp.13195](https://doi.org/10.1111/jfpp.13195).
- Domínguez-Hernández, E., Rangel-Hernández, J., Morales-Sánchez, E., & Gaytán-Martínez, M. (2022). Effect of ohmic heating nixtamalization on the structural and physicochemical characteristics of instant maize flours and their relation to starch modifications. *Biology and Life Sciences Forum*, 20(7). [10.3390/IECBM2022-13380](https://doi.org/10.3390/IECBM2022-13380).
- Hatamian, M., Noshad, M., Abdanan-Mehdizadeh, S., & Barzegar, H. (2020). Effect of roasting treatment on functional and antioxidant properties of chia seed flours. *NFS Journal*, 21,1-8. [10.1016/j.nfs.2020.07.004](https://doi.org/10.1016/j.nfs.2020.07.004).
- Ishita, C., Pooja, N., Sib Sankar, M., Uttam, C. P., Hafizur, R., & Nirmal, M. (2022). An insight into the gelatinization properties influencing the modified starches used in food industry: A review. *Food Bioprocess Technology*, 15, 1195–1223. [10.1007/s11947-022-02761-z](https://doi.org/10.1007/s11947-022-02761-z).
- Laudadio, V., Bastoni, E., Introna, M. & Tufarelli, V. (2013). Production of low-fiber sunflower (*Helianthus annuus L.*) meal by micronization and air classification processes. *CYTA – Journal of Food*, 11(4), 398–403. [10.1080/19476337.2013.781681](https://doi.org/10.1080/19476337.2013.781681).
- Lima-Becerra, I., Balbuena-Alonso, M. G., Dorantes-Campuzano, F., Mojica, L., Loarca-Piña, G., Morales-Sánchez, E., Ramírez-Jiménez, A.K., & Gaytán-Martínez, M. (2021). Ohmic Heating as an Emerging

- Technology for the Improvement of the Techno-Functional Properties of Common Bean Flour. *Biology and Life Sciences Forum*, 6(95). [10.3390/Foods2021-11000](https://doi.org/10.3390/Foods2021-11000).
- Lu, X., Rongrong, M., Zhan, J., Wang, F., & Tian, Y. (2022). The role of protein and its hydrolysates in regulating the digestive properties of starch: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 25, 54-65. [10.1016/j.tifs.2022.04.027](https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.027).
- Madaraboina, V. R., Akhil, K. G., Sunil, C. K., Venkatachalapathy, N., & Jaganmohan, R. (2021). Effect of microwave treatment on physical and functional properties of foxtail millet flour. *International Journal of Chemical Studies*, 9(1): 2762-2767. [10.22271/chemi.2021.v9.i1am.11641](https://doi.org/10.22271/chemi.2021.v9.i1am.11641).
- Martínez-Bustos, F., García, M. N., Chang, Y. K., Sánchez-Sinencio, F., & Figueroa, C. J. D. (2000). Characteristics of nixtamalized maize flours produced with the use of microwave heating during alkaline cooking. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80, 651-656. [10.1002/\(SICI\)1097-0010\(20000501\)80:6<651::AID-JSFA561>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(20000501)80:6<651::AID-JSFA561>3.0.CO;2-4).
- Matz, S. (1972). *Bakery Technology and Engineering*. Springer New York.
- Mahalaxmi, S., Himashree, P., Malini, B., & Sunil, C. K. (2022). Effect of microwave treatment on the structural and functional properties of proteins in lentil flour. *Food Chemistry Advances*, 1. [10.1016/j.focha.2022.100147](https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100147).
- Ménera-López, I., Gaytán-Martínez, M., Reyes-Vega, M. L., Morales-Sánchez, E., & Figueroa, J. D. (2013). Physico-chemical properties and quality assessment of corn flour processed by a continuous ohmic heating system and traditional nixtamalization. *CyTA - Journal of Food*, 11, 8-14. [10.1080/19476337.2012.762692](https://doi.org/10.1080/19476337.2012.762692).
- Nan-nan, A., Li, D., Wang, L.-J., & Wang, Y. (2023). Microwave irradiation of corn kernels: Effects on structural, thermal, functional and rheological properties of corn flour. *Food Hydrocolloids*, 143. [10.1016/j.foodhyd.2023.108939](https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108939)
- Otondi, E., Nduko, J. & Omwamba, M. (2020). Physico-chemical properties of extruded cassava-chia seed instant flour. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2(3). [10.1016/j.jafr.2020.100058](https://doi.org/10.1016/j.jafr.2020.100058).
- Ozolina, K., Sarenkova, I., & Muizniece-Brasava, S. (2024). Estimation of roasted and raw faba bean and lentil flour functional properties. *Food & Nutrition Journal*, 8. [10.29011/2575-7091.100183](https://doi.org/10.29011/2575-7091.100183).
- Pismag, R. Y., Rivera, J. D., Hoyos, J. L., Bravo, J. E. & Roa, D. F. (2024) Effect of extrusion cooking on physical and thermal properties of instant flours: a review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8. [10.3389/fsufs.2024.1398908](https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1398908)

- Potter, N. N., & Hotchkiss, J. H. (1998). *Food Science*. Springer Science & Business Media.
- Ramírez-Jiménez, A. K., Rangel-Hernández, J., Morales-Sánchez, E., Loarca-Piña, G., & Gaytán-Martínez, M. (2019). Changes on the phytochemicals profile of instant corn flours obtained by traditional nixtamalization and ohmic heating process. *Food Chemistry*, 276(2), 57-62. [10.1016/j.foodchem.2018.09.166](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.166)
- Ranganathan, V., Nunjundiah, I. T. & Bhattacharya, S. (2013). Effect of roasting on rheological and functional properties of sorghum flour. *Food Science and Technology International*, 20(8), 579-589. [10.1177/1082013213497210](https://doi.org/10.1177/1082013213497210)
- Rubel, W. (2011). *Bread. A global history*. Reaktion Books.
- Ruiz-Armenta, X. A., Ruiz-Armenta, J. E., Espinoza-Moreno, R. J., Gutiérrez-Dorado, R., Aguilar-Palazuelos, E., Zazueta-Morales, J. J., & Gómez-Favela, M. A. (2022). Aprovechamiento de subproducto de sésamo y extrusión optimizada para obtención de harina funcional con propiedades tecno-funcionales, nutricionales y antioxidantes mejoradas. *Acta Universitaria*, 32, 1-20. [10.15174/au.2022.3494](https://doi.org/10.15174/au.2022.3494).
- Sun, S., Watts, B. M., Lukow, O. M., & Arntfield, S. D. (2006). Effects of micronization on protein and rheological properties of spring wheat. *Cereal Chemistry*, 83(4), 340-347. [10.1094/CC-83-0340](https://doi.org/10.1094/CC-83-0340)
- Zhou, W., Therdthai, N., & Hui, Y. H. (2014). Introduction to Baking and Bakery Products, en W. Zhou, Y. H. Hui, I. De Leyn, M. A. Pagani, C. M. Rosell, J. D. Selman, N. Therdthai (Eds.), *Bakery Products: Science and Technology* (Second Edition). John Wiley & Sons.

Metaanálisis de estrategias de los institutos nacionales de metrología y su relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Meta-analysis of national metrology institutes' strategies and their relationship with the United Nations Sustainable Development Goals

César Alonso Gutiérrez Rojas*

Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México

* cesargr182@gmail.com

Fecha de recepción: 1 de septiembre del 2024

Fecha de aceptación: 20 de noviembre del 2024

Resumen

Los Institutos Nacionales de Metrología son organizaciones especializadas en mediciones físicas y químicas. Aunque muchos países han limitado sus contribuciones a la industria, su impacto va más allá, contribuyendo en las esferas económica, social, ambiental, entre otras. Esta importancia contrasta con el escaso apoyo y reconocimiento que se les otorga. Por otro lado, el mundo enfrenta desafíos que deben abordarse con urgencia y que han sido conceptualizados por las Naciones Unidas en sus 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), enfocados en los ámbitos económico, social y ambiental.

En este contexto, la presente investigación cualitativa analiza la dirección que están tomando los INMs del mundo, con una muestra representativa para el periodo 2020-2030, y se pregunta si las estrategias de estas organizaciones están alineadas con las necesidades planteadas por los ODS. Se realizó con una muestra teórica, intencionada, de documentos de planificación estratégica, los cuales fueron analizados y codificados por estrategia. Algunos de estos documentos mostraron una congruencia perfecta con ciertos ODS, mientras que otros resultaron estar únicamente orientados hacia la industria, posiblemente debido al marco de políticas públicas nacionales y la necesidad de obtener sus propios recursos financieros. Finalmente, se evidenció que algunos ODS, como “Reducción de las desigualdades” y “Reducción de la pobreza”, no están en el radar de los INMs, aunque algunos investigadores sugieren que, al influir en la “educación”, pueden tener un impacto



positivo indirecto en los ODS relacionados con la reducción de la pobreza.

Palabras clave: estrategias 2020-2030, infraestructura de la calidad, institutos nacionales de metrología, metaanálisis, objetivos de desarrollo sostenible

Abstract

National Metrology Institutes (NMIs) are organizations specialized in physical and chemical measurements. Although many countries have limited their contributions to the industry, their impact extends further, contributing to the economic, social, and environmental spheres. This significance contrasts with the limited support and recognition they receive. Meanwhile, the world faces challenges that must be urgently addressed, challenges that have been conceptualized by the United Nations in its 17 Sustainable Development Goals (SDGs), focusing on economic, social, and environmental domains.

In this context, the present qualitative research analyzes the direction that NMIs worldwide are taking, with a representative sample for the 2020-2030 period, and questions whether the strategies of these organizations are aligned with the needs outlined by the SDGs. A theoretical and intentional sample of strategic planning documents was selected, analyzed, and coded by strategy. Some of these documents showed perfect alignment with certain SDGs, while others were solely industry-oriented, possibly due to the framework of national public policies and the necessity to secure their own financial resources. Finally, it became evident that some SDGs, such as “Reduction of Inequality” and “Poverty Reduction,” are not on the radar of the NMIs. However, some researchers suggest that by influencing “education,” NMIs can have an indirect positive impact on the SDGs related to poverty reduction.

Keywords: strategies 2020-2030, quality infrastructure, national metrology institutes, meta-analysis, sustainable development goals

Introducción

Los Institutos Nacionales de Metrología (INMs) son creados por decreto, generalmente bajo la coordinación de la Secretaría de Economía (Ministerio de Economía o Departamento de Comercio), con el objetivo de contribuir en tres campos clave para el desarrollo económico de un país: protección (regulación del Estado), mercado (requisitos del comprador) e innovación (creatividad empresarial). Estos institutos apoyan todas las

actividades de la infraestructura de calidad: Normalización, Metrología, Ensayos, Certificación y Acreditación. Existe una necesidad nacional crítica en todos los países —impulsada por la comunidad de metrologos— de generar una mayor conciencia sobre la viabilidad y conveniencia de contar con un INM como referente no solo en las ciencias de la ingeniería o las ciencias formales, donde ya es bien sabido y comprobado su beneficio (North, 1990; Temple *et al.*, 2005; Czubala y Guash, 2007, Trajkovic y Milosevic, 2016; Fisher, 2022; Olu-lawal *et al.*, 2024), sino también de las ciencias sociales y las ciencias naturales.

Según William P. Fisher Jr. y A. Jackson Stenner (2022), sin un INM de clase mundial, un país enfrenta barreras como:

1. El enorme costo de desarrollar e implementar estas medidas de manera independiente.
2. La falta general de conocimiento sobre las décadas de investigación que respaldan la viabilidad y las ventajas únicas de los patrones nacionales —responsabilidad de los INMs— cuya trazabilidad asegura la conexión de los resultados de medición con las unidades base del Sistema Internacional de Unidades (SI), limita su aplicación en las ciencias sociales.
3. Un escaso reconocimiento público tanto de los altos rendimientos que proporcionan las inversiones en metrología como del papel vital que dicha disciplina ha jugado en la historia de la ciencia y el capitalismo.
4. Orientaciones institucionales más capaces de atender las necesidades de los paradigmas existentes que de favorecer la aparición de nuevos.
5. Suposiciones culturales profundamente arraigadas sobre la naturaleza del número y los supuestos límites de la medición psicosocial.

Por si fueran pocas estas barreras, la claridad de un país para apoyar a su INM se ve nublada por varios factores. En primer lugar, a pesar de la existencia prolongada de datos, instrumentos y teorías que afirman lo contrario, se cree ampliamente y de manera errónea que la medición fundamental de los constructos, medida por observaciones ordinales, es imposible. En segundo lugar, también se cree, erróneamente, que todos los números son intrínsecos, siempre efectivos y cuantitativos, y que las supuestas diferencias son meramente académicas y carecen de consecuencias prácticas. En tercer lugar, la infraestructura metroológica es casi completamente invisible para el público y

se da por sentada, lo que significa que los esfuerzos locales para expandirla a un nuevo dominio son virtualmente inútiles e inevitablemente fútiles. En cuarto lugar, el sistema actual de incentivos y recompensas hace muy difícil, si no imposible, que individuos, investigadores y docentes influyan en el comportamiento y las decisiones de sus clientes o estudiantes, dado que estos están culturalmente arraigados en sistemas ordinales y premisas locales y políticas, aunque malentendidos y mal valorados. Finalmente, incluso cuando un individuo u organización comprende la importancia de las nuevas tecnologías de medición, estas pocas instancias aisladas y descoordinadas dependen en exceso del liderazgo local y eventualmente se ven privadas de sustento por la falta de una cultura metrológica en una red más grande.

Asumiendo que la metrología es transversal a todas las ciencias y que no solo afecta a las formales —una idea que a menudo es difícil de concebir—, el objetivo de esta investigación es realizar un metaanálisis basado en las estrategias de planificación de los INMs. Como resultado de esta revisión de literatura se empleará el software Atlas Ti para llevar a cabo un estudio cualitativo sobre la orientación estratégica que siguen los INMs a nivel mundial, utilizando una muestra teórica representativa de todas las regiones del mundo y considerando el caso de México. El propósito es comparar la ruta que estas organizaciones han declarado seguir hasta el horizonte 2030, en contraste con los desafíos globales identificados por las Naciones Unidas (ONU) y expresados en sus 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Los ODS fueron seleccionados evitando sesgos, ya que estos representan una propuesta realizada por los miembros de la ONU, junto con Organizaciones No Gubernamentales y ciudadanos de todo el mundo, que buscan alcanzar de manera equilibrada tres dimensiones del desarrollo sostenible: los ámbitos económico, social y ambiental.

Materiales y Métodos

La muestra teórica se seleccionó siguiendo dos criterios principales. En primer lugar, se buscó incluir en la muestra al menos un INM representativo de cada continente. En el caso de la región europea, se consideró un documento que consolidaba las estrategias de los INMs miembros de dicha región, denominado EURAMET (Asociación Europea de Institutos Nacionales de Metrología) con los documentos EURAMET 2030 Strategy (2021), Bosse (2020), Barker *et al.* (2011) y Thompson (2022). Para el continente americano, se incluyeron el Centro Nacional

de Metrología de México (CENAM) con su documento Strategic planning exercise 2022-2030 (2022), el Centro de Investigación en Metrología (NRC) que pertenece al Consejo Nacional de Investigación de Canadá y el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de Estados Unidos (NIST) estuvieron representados por los documentos PAWG Strategic Plan 2021-2030 (2021), CCQM Strategy document 2021-2030 (2021) y L. Yong (2017). En cuanto al medio oriente, se analizaron el Laboratorio Nacional de Física y Estándares de Pakistán (NPSL) (Khanzada, 2019) y el Centro Nacional de Medición y Calibración de Arabia Saudita (NMCC) (Kumar, 2021). Finalmente, para Asia, se incluyó el Instituto de Investigación de Estándares y Ciencia de Corea (KRISS) (Min, 2021).

En segundo lugar, además de la representatividad regional, se buscó que los INMs seleccionados fueran aquellos con mayor reconocimiento y liderazgo, lo que podría decirse coloquialmente como los que “marcan tendencia”. Una forma de medir este reconocimiento es a través del número de CMCs (Capacidades de Medición y Calibración) que han registrado en la KCDB (Base de Datos de Comparaciones Clave) del BIPM (Oficina Internacional de Pesas y Medidas). Cuanto más registros posee un INM, mayor es su prestigio y capacidad. La lista mencionada cumple con ambos criterios, sin embargo, dado que no afecta incluir más, durante el desarrollo de esta investigación se agregaron documentos de planificación estratégica de otros INMs, por lo que la lista mencionada no es exhaustiva. Por ejemplo, se añadió un documento confidencial del PTB (Instituto Nacional de Metrología de Alemania), el cual fue comparado con el documento previamente analizado de EURAMET.

Para el análisis cualitativo se utilizó el software Atlas Ti para codificar y analizar las estrategias contenidas en los documentos de los INMs. El proceso de codificación permitió identificar temas y patrones emergentes en las estrategias de los INMs, así como su alineación (o falta de ella) con los ODS de la ONU. Cada uno de los documentos estratégicos fue contrastado con los 17 ODS, que incluyen: 1.- Fin de la pobreza, 2.- Hambre cero, 3.- Salud y bienestar, 4.- Educación de calidad, 5.- Igualdad de género, 6.- Agua limpia y saneamiento, 7.- Energía asequible y no contaminante, 8.- Crecimiento económico, 9.- Innovación en la industria, 10.- Reducción de las desigualdades, 11.- Ciudades sostenibles, 12.- Producción y consumo responsables, 13.- Acción por el clima, 14.- Vida submarina, 15.- Vida de

ecosistemas terrestres, 16.- Paz y justicia, y 17.- Alianzas para lograr los objetivos (consultar ODS de la ONU).

La técnica de codificación abierta permitió descomponer las estrategias en unidades más pequeñas de análisis que luego se agruparon en categorías relacionadas con los ODS. A través de la codificación axial se establecieron conexiones entre las diferentes estrategias y los objetivos específicos de los ODS. Este enfoque metodológico cualitativo no solo permitió identificar coincidencias, sino también contrastar las divergencias en las estrategias de los INMs con respecto a los desafíos globales planteados por los ODS. Dicho proceso de triangulación de datos a partir de múltiples fuentes y técnicas de codificación contribuye a la validez del análisis, proporcionando una visión integral de cómo los INMs están alineando (o no) sus estrategias con los ODS y revelando áreas críticas, para la sociedad, que podrían no estar siendo adecuadamente abordadas en sus planes estratégicos.

El análisis se centró en identificar las estrategias presentes en la planificación de los INMs y codificarlas, lo que resultó en la tabla que se muestra (ver Tabla 1). La columna “Fundamentado” contiene el número de veces que se encontró la estrategia en cuestión, de acuerdo con el “Criterio” descrito; por lo tanto, refleja su popularidad, aunque no necesariamente su importancia dentro del contexto estratégico de los INMs. Es importante destacar que una mayor frecuencia en esta columna indica qué estrategias son más comunes en la planificación, pero no implica que sean las más efectivas o críticas.

La columna “Densidad” presenta el número de relaciones que la estrategia tiene con otras dentro del marco estratégico de los INMs. Esta métrica es particularmente relevante en un análisis cualitativo, ya que la densidad de conexiones entre estrategias puede ser indicativa de su centralidad e influencia dentro de la red estratégica global de los INMs. Una alta densidad sugiere que la estrategia en cuestión está altamente interrelacionada con otras y puede desempeñar un papel clave en la alineación de las metas organizacionales con los ODS.

Además del análisis de fundamentado y densidad (ver Tabla 1, en resultados), se aplicaron técnicas de codificación axial para explorar cómo estas estrategias se integran y contribuyen al logro de los ODS. La interrelación entre estrategias, identificada mediante el software Atlas Ti, permitió mapear las áreas clave de convergencia y divergencia entre los INMs. Se observó que algunas estrategias están fuertemente alineadas con ciertos ODS, mientras que otras muestran una débil o inexistente re-

lación con los objetivos globales (ver Figura 1, en resultados). Este enfoque cualitativo proporciona una comprensión más profunda del papel de los INMs en la promoción del desarrollo sostenible y revela las áreas donde se requiere una mayor alineación estratégica para cumplir con los ODS establecidos por la ONU.

Resultados

Tabla 1

Libro de códigos.

Nombre del Código	Criterio/Descripción	Fundamentado	Densidad
Innovación en la industria	Esfuerzos, estrategias o inversión enfocados en proyectos I+D, DT.	7	3
Alianzas	Proyectos de colaboración, convenios de intercambio, donaciones.	6	2
Crecimiento económico	Esfuerzos con miras en la retribución económica, para el país o el propio INM.	5	4
Acción por el clima	Trabajos, proyectos o estrategias enfocadas en la reducción de contaminación	5	5
Políticas públicas	Búsqueda de la incidencia para participar en las PP de un gobierno (normas oficiales, leyes, decretos, tratados, proyectos prioritarios del Edo.)	4	0
Competencia	Esfuerzos y estrategias que mencionan el componente medir a un competidor, salir primero al mercado, ser los primeros en desarrollar algo, etc.	4	0
Salud y bienestar	Metas y proyectos que mejoren la salud y o bienestar de la población.	4	0
Biodiversidad	Proyectos en puesta que involucren la variedad de seres vivos que existen en el planeta y las relaciones que establecen entre sí y con el medio que los rodea.	3	1
Educación de calidad	Proyectos o estrategias que busque mejorar la calidad en la educación, como pueden ser, alianzas, intercambios, donaciones, ampliaciones de cobertura.	3	2
Manufactura avanzada	Industria 4.0, Transformación digital y cualquier otra tecnologías o metodologías innovadoras para mejorar la competitividad en los sectores de fabricación.	3	1
Tecnología amigable con el ambiente	Desarrollos, patentes, investigación en tecnología de menos consumo o contaminación, a lo ya existente.	3	1

Reducción de contaminación en bosques y océanos	Iniciativas y proyectos encaminados a beneficio de bosques y océanos.	3	0
Química y biología	Inversión en laboratorios, intercambio de información y transferencia de conocimientos en química y/o biología.	3	0
Desempeño organizacional	Inversión de tiempo o dinero, en estrategias y metodologías enfocadas en la administración y gestión.	2	1
Saneamiento de agua	Proyectos o inversión destinados al saneamiento y descontaminación de océanos, ríos o mantos acuíferos.	2	2
Comercio	Estrategias y proyectos encaminados a tener incidencia en el comercio, ya sea por medio de normas, y regulaciones, transferencia de conocimientos o proyectos con actores de la infraestructura de la calidad.	2	2
Transformación digital	Esfuerzos encaminados al internet de las cosas, la sistematización de los procesos y la supervisión y control a distancia.	2	1
Economía circular	Proyectos o inversión para reciclar o reusar materiales y productos.	2	1
Energía asequible y no contaminante	Esfuerzos que coadyuven a bajar las tarifas de energía eléctrica, o bien, para ampliar la cobertura del servicio de energía eléctrica, con fuentes no contaminantes.	2	2
Fin de la pobreza	Esfuerzos que coadyuven a zonas marginadas a aumentar la cobertura de servicios básicos oportunidades de trabajo y generación de ingresos.	1	2
Ciudades sostenibles	Estrategias que contengan componentes de economía circular, reducción de contaminación y consumo responsable de recursos naturales.	1	3
Movilidad	Proyectos que consideren temáticas como: infraestructura conectada, acceso a datos, Transporte alternativo, Vehículos autónomos, Gestión de tránsito, Aplicaciones de Movilidad	1	0
Producción y consumo responsable	Esfuerzos encaminados al consumo de productos con certificación "A" de consumo energético eficiente, biodegradables o con el distintivo de respetuoso con el medio ambiente, así como de producción y comercialización eficiente (menor consumo de energía o contaminación al convencional).	1	1

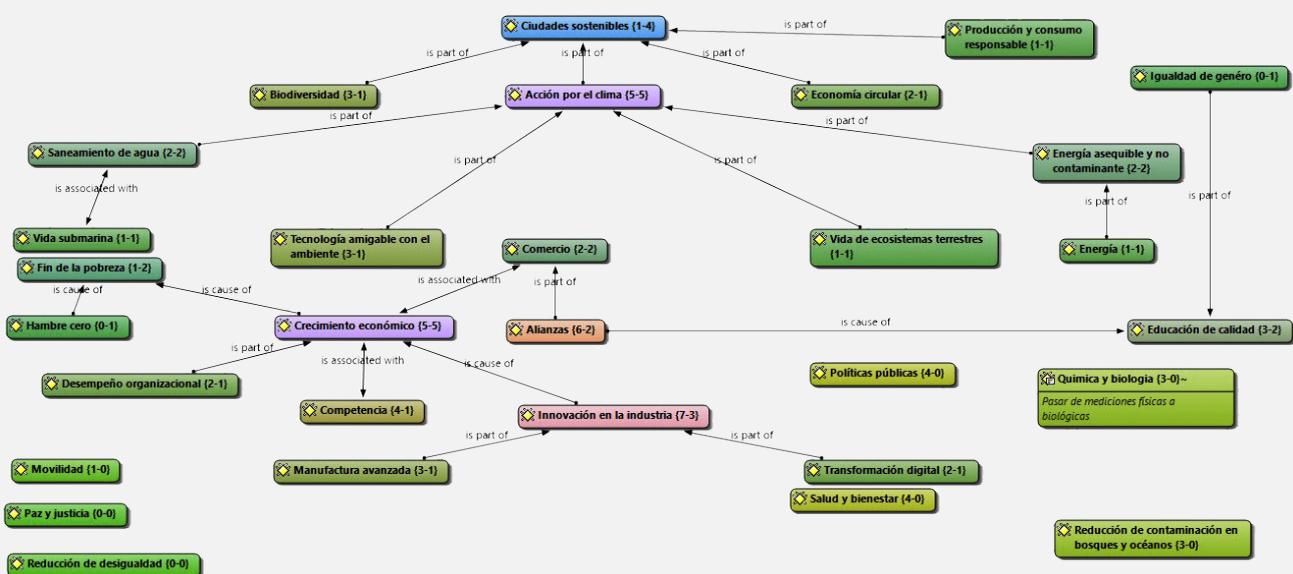
Vida submarina	Proyectos con enfoque en océanos y vida marina.	1	1
Vida de ecosistemas terrestres	Proyectos con enfoque en ecosistemas terrestres	1	1
Energía	Proyectos con enfoque en energía, en cualquier parte de la cadena de valor generación, distribución y comercialización.	1	1
Reducción de desigualdad	Esfuerzos encaminados a la inclusión social, económica y política de todas las personas, independientemente de su edad, sexo, discapacidad, raza, etnia, origen, religión o situación económica.	0	0
Paz y justicia	Esfuerzos encaminados al cumplimiento de leyes y regulaciones.	0	0
Hambre cero	Estrategias o participación en proyectos que coadyuven a la reducción del hambre en zonas marginadas, o bien, a la seguridad alimentaria.	0	1
Igualdad de género	Estrategias, o metas implementadas en los INMs, para eliminar la discriminación de género.	0	1

Fuente: Elaboración propia con Atlas ti.

Posteriormente, se analizó si existe relación entre los códigos y de que tipo, dando como resultado la siguiente red (ver Figura 1).

Figura 1

Red de estrategias abordadas por los INMs del mundo (muestra teórica.)



Fuente: Elaboración propia con Atlas ti

Discusión

Los Institutos Nacionales de Metrología (INMs) se definen como Centros de Investigación coordinados por el Estado y apoyados por éste; sin embargo, en muchas ocasiones, el apoyo económico es insuficiente, lo que obliga a los INMs a desarrollar estrategias para la generación de ingresos. Este desafío ha intervenido las estrategias de los INMs, de tal manera que, además de encontrar una alineación mayoritaria con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), se identificaron otras estrategias que incluyen: Comercio, Competencia, Desempeño Organizacional, Economía Circular, Energía, Manufactura Avanzada, Movilidad, Políticas Públicas, Química y Biología, Tecnología Amigable con el Medio Ambiente y Transformación Digital, que de alguna manera pueden traer consigo beneficios sociales sin perder de vista los económicos.

No se encontraron estrategias alineadas con los ODS relacionados con la “Reducción de la desigualdad”, “Paz y justicia”, “Hambre cero” e “Igualdad de género” de manera tácita, lo que sugiere que estos no son temas de interés prioritario para los directivos de los INMs, o que no existe un conocimiento claro de cómo los INMs pueden contribuir a estos temas de interés global. Aunque no se puede afirmar categóricamente que no exista interés, la muestra analizada no proporcionó indicios claros de la intención de contribuir a estos cuatro ODS.

La ciencia respalda el valor de las formas tangibles de capital económico al garantizar que las mediciones de productos, desde minutos hasta kilowatts y barriles, sean universalmente verificables y comparables. El creciente interés en el valor económico de las formas intangibles de capital humano y social, estudiadas en las ciencias del comportamiento y sociales, plantea la pregunta de si la calidad de las mediciones en estas áreas podría algún día acercarse al rigor científico y la conveniencia práctica de las mediciones en las ciencias naturales. Más de 80 años de investigación sugieren firmemente que la respuesta a esta pregunta es afirmativa. Por lo tanto, se puede observar cómo, poco a poco, las estrategias de los INMs se están diversificando, considerando los campos de las ciencias sociales, naturales y económicas.

En el capítulo “Metrology for the Social, Behavioral, and Economic Sciences” de Fisher (2022), se afirma que una infraestructura metrológica para las ciencias sociales, del comportamiento y económicas tiene un potencial fundamental y transformador relacionado con la educación, la atención médica, la gestión de recursos humanos y naturales, la evaluación del desempeño organizacional y la economía. Por lo tanto, el

simple hecho de contar con una infraestructura metroológica robusta, como es el caso de todos los INMs analizados en esta muestra, abre la posibilidad de influir de manera implícita en la reducción de la pobreza, debido a su impacto en la economía, pero sobre todo en la educación, según Mihai (2015).

Otra posibilidad de convergencia entre los ODS de la ONU y la dirección estratégica de los INMs, aunque sutil, es orquestada por el BIPM, que cada año elige un tema para celebrar el Día Mundial de la Metrología. En 2020 el tema fue “Mediciones para el comercio global”, en 2021 “Mediciones para la salud”, en 2022 “Metrología en la Era Digital” y en 2023 “Mediciones para apoyar la alimentación global”. Estas temáticas no solo reflejan las prioridades emergentes en el ámbito global, sino que también sugieren un alineamiento progresivo de las estrategias de los INMs con los desafíos globales, lo que podría implicar una mayor sinergia con los ODS en el futuro.

Este análisis cualitativo revela que, aunque los INMs muestran una alineación significativa con ciertos ODS, todavía existen brechas estratégicas en áreas clave como la igualdad, la justicia y la reducción de la pobreza. Estas podrían ser abordadas mediante una mayor integración de dichas temáticas en la planificación estratégica de los INMs, fortaleciendo así su contribución al desarrollo sostenible global, y paralelamente, de esta forma, lograr su objetivo de ser más visibles.

Conclusiones

Alineación parcial con los ODS

Aunque los INMs muestran una alineación significativa con algunos ODS, como los relacionados con el comercio global, la salud, la tecnología ambiental y la educación, existen brechas evidentes en su contribución a ODS fundamentales como “Reducción de desigualdades”, “Paz y justicia”, “Hambre cero” e “Igualdad de género”. Esto refleja una orientación estratégica predominantemente técnica y económica, que subestima el potencial transformador en áreas sociales más amplias.

Impacto implícito en la reducción de la pobreza

Si bien no se encontraron estrategias explícitas dirigidas a la reducción de la pobreza, la infraestructura metroológica de los INMs, al influir en la educación y la economía, tiene un impacto indirecto en este ODS, según estudios previos como los de Mihai (2015). Lo anterior sugiere un efecto positivo implícito que podría ser aprovechado de manera más directa y explícita.

Diversificación estratégica en evolución	Los INMs han comenzado a diversificar sus estrategias hacia áreas como la economía circular, la manufactura avanzada y la transformación digital. Estas iniciativas, además de su orientación técnica, pueden generar beneficios sociales significativos, alineándose progresivamente con los desafíos globales.
Liderazgo temático del BIPM	Las temáticas seleccionadas anualmente por el BIPM para el Día Mundial de la Metrología reflejan una convergencia emergente entre las prioridades estratégicas de los INMs y los desafíos globales planteados por los ODS. Este alineamiento podría incrementarse si los INMs integran más profundamente estas temáticas en su planificación estratégica.
Potencial no explotado en los ODS sociales	Los INMs poseen capacidades técnicas que podrían expandirse para abordar de manera más directa problemas como la desigualdad y la justicia social. Esto requiere un cambio conceptual que los conecte con áreas menos exploradas, como la metrología en ciencias sociales y del comportamiento, siguiendo la propuesta de Fisher (2022).
Necesidad de apoyo sostenido del Estado	El insuficiente apoyo económico del Estado obliga a los INMs a priorizar estrategias orientadas hacia la generación de ingresos, lo que puede limitar su capacidad para diversificar su impacto en áreas sociales y ambientales. Un financiamiento estable, suficiente y sin presiones económicas cortoplacistas, permitiría a los INMs adoptar un enfoque más balanceado y alineado con los ODS.
Rol transformador de la infraestructura metrológica	Cerca de 150 años de incidencia directa —considerando la fecha del tratado del metro realizada en mayo de 1875— del rigor científico de las mediciones a campos como la educación, la atención médica y la innovación subrayan el potencial transformador de una infraestructura metrológica robusta en los ámbitos social y económico.
Oportunidad de liderazgo global	Los INMs, al ser actores clave en la infraestructura de calidad de los países, tienen la oportunidad de posicionarse como líderes en el cumplimiento de los ODS al integrar estrategias explícitas para abordar desafíos globales en áreas menos exploradas, como las desigualdades y la pobreza.
Visibilidad y legitimidad internacional:	Una mayor visibilidad de los INMs en el contexto global, especialmente mediante la articulación de su impacto en los ODS, puede fortalecer su legitimidad y atraer recursos adicionales.

Esto requiere una estrategia de comunicación más proactiva y alineada con las prioridades globales.

Referencias

- Barker, K. E., Cox, D., & Sveinsdottir, T. (2011). Foresight on the future of public research metrology in Europe, *Foresight*, 13(1), 5-18. <https://doi.org/10.1108/14636681111109660>
- Bosse, H., Evans, A., Zeleny, V., Czulek, D., Balsamo, A., O'Connor, D., Yandayan, T., Billington, D., Meli, F., Ragusa, C. S., & Flys, O. (2020, 8-12 June). AdvManuNet: A networking project on metrology for advanced manufacturing. *Proc Euspen's 20th International Conference & Exhibition*, Geneva, CH. <https://www.euspen.eu/knowledge-base/ICE20374.pdf>
- Calzadilla-Sarmiento, B., Loesener, O., & Davila, J. P. (2017). *Quality Infrastructure of the Americas. Strategic Roadmap*. United Nations Industrial Development Organization.
- CCQM (2021). *Strategy document 2021-2030* <https://www.bipm.org/documents/20126/2071059/CCQM+Strategy.pdf/31283069-94f4-f2c7-bbfc-7d652c9b3de8>
- CENAM (2022). *Planeación Estratégica del CENAM 2022-2030*. https://www.cenam.mx/transparencia/Archivos/2024/Reporte_Planeaci%C3%B3n_CENAM_2022-2030.pdf
- Czubala, W., Shepherd, B., & Wilson, J. S. (2009). Help or hindrance? the impact of harmonized standards on African exports. *Journal of African Economies*, 18(5), 711-744. <https://doi.org/10.1093/jae/ejp003>
- Fisher, W., & Massengill, P. (2022). *Explanatory Models, Unit Standards, and Personalized Learning in Educational Measurement*. Springer.
- EURAMET. (2021). *The gateway to Europe's integrated metrology community: EURAMET 2030 Strategy*.
- Gilmore, I., Lenssen, L., Brown, R., Shore, P., & Janssen, J. T. (September 2022). *Metrology Research Roadmaps*. NPL.
- Guasch, J. L., Racine, J.-L., Sánchez, I., & Diop, M. (2007). *Quality Systems and Standards for a Competitive Edge*. The World Bank, Washington D.C, United States.
- Khazada, F., & Abbasi, K. (October 2019). Economic imperatives of metrology for Pakistan. *15th International Conference: "Standardization, Prototypes and Quality: A Means of Balkan Countries' collaboration"*. Trakya University, Edirne, Turkey. https://www.researchgate.net/publication/337171240_ECONOMIC_IMPERATIVES_OF_METROLOGY_FOR_PAKISTAN
- Kumar, V., & Albashrawi, S. (2022). Quality Infrastructure of Saudi Arabia and Its Importance for Vision 2030. *MAPAN*, 37, 97-106. <https://doi.org/10.1007/s12647-021-00523-4>

- Mihai, M., Titan, E., & Manea, D. (2015). Education and Poverty. *Procedia Economics and Finance*, 32(6), 855-860. [10.1016/S2212-5671\(15\)01532-4](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)01532-4)
- Min, H. (2021). *KRISS Vision 2035*. Korea Research Institute of Standards and Science. <https://www.kriss.re.kr/eng/download/vision.pdf>
- North, D. C. (1990). *Institutions, Institutional Change, and Economic Performance*. Cambridge University Press. Cambridge, England.
- Objetivos de Desarrollo Sostenible. ONU. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/>
- Olu-lawal, K. A., Olajiga, O. K., Ani, E. C., Adeleke, A. K., & Portillo Montero, D. J. (2024). The role of precision metrology in enhancing manufacturing quality: a comprehensive review. *Engineering Science & Technology Journal*, 5(3), 728-739. <https://doi.org/10.51594/estj.v5i3.868>
- PAWG. (December 2021). *Strategic Plan 2021-2030*.
- Temple, P., Witt, R., Spencer, C., Blind, K., Jungmittag, A., & Swann, P. (2005). *The empirical economics of standards*. UK Department of Trade and Industry. United Kingdom.
- Trajković, A. R., & Milošević, I. (2016). Model to determine the economic and other effects of standardization, a case study in Serbia. *Total Quality Management & Business Excellence*, 29(5-6), 1-13. [10.1080/14783363.2016.1225496](https://doi.org/10.1080/14783363.2016.1225496)

Guía para la elaboración del apartado metodológico de protocolos de investigación clínicos, biomédicos y epidemiológicos

Guideline for the preparation of the methodological section of clinical, biomedical and epidemiological research protocols

Adrián Enrique Hernández-Muñoz

Sara Nahián Martínez-Mosso

Sujey Ugalde-Barrón*

María Pia Mendoza-Fonseca

Luis Marco Aguilar-Ramos

Jovana Álvarez-Alvarado

Isidro Amadeo Gutiérrez-Álvarez

Rodrigo Miguel González-Sánchez

Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, Mexico

* sugalde19@alumnos.uaq.mx

Fecha de recepción: 1 de septiembre del 2024

Fecha de aceptación: 25 de noviembre del 2024

Resumen

Las investigaciones en las ciencias naturales, y en las áreas de la salud, conllevan al avance de la atención clínica. La precisión del Apartado Metodológico (Am) de un protocolo permitirá que, al concluirse la investigación, se puedan extrapolar sus resultados a nuevas investigaciones. Ante ello, el objetivo del presente manuscrito consiste en describir las etapas para la elaboración del Am en protocolos de investigación clínicos, biomédicos y epidemiológicos. Considerando lo anterior, por medio de una revisión bibliográfica no sistemática, se realizó una revisión narrativa del tema. La correcta ejecución del Am puede realizarse en seis etapas: primero establecer las hipótesis y objetivos de trabajo, seguido del diseño de investigación. Posteriormente, se calculará la muestra, y se referirán las variables del estudio. Finalmente, se deberán describir no solo las maneras en que se preverán sesgos y errores, sino también el plan de análisis estadístico el cual, dependiendo de las hipótesis y objetivos, podrá ser descriptivo, inferencial o multivariado. La aceptación de un protocolo de investigación se deberá a un Am bien estructurado. Igualmente, el precisar las áreas de bioestadística



garantizará no solo la correcta realización del proyecto, sino también su aplicación y reproducibilidad.

Palabras clave: protocolo, metodología, diseño de investigación, bioestadística, tamaño de muestra

Abstract

Research in the natural sciences, and in healthcare areas, leads to the advancement of clinical care. The precision of a protocol's Methodological Section (Ms) allows that, upon completion of the research project, the results can be extrapolated to new research studies. In view of this, the objective of this manuscript is to describe the stages for the elaboration of the Ms in clinical, biomedical and epidemiological research protocols. Considering the above, and through a non-systematic bibliographic search, a narrative review was carried out. The correct execution of the Ms can be done in six stages: first, establish the hypotheses and objectives of the work, followed by the research design. Then, the sample must be calculated, and the study variables have to be referred. Finally, not only the ways in which biases and errors will be anticipated have to be described, but also the statistical analysis plan which, depending on the hypotheses and objectives, can be descriptive, inferential or multivariate. The acceptance of a research protocol will be due to a well-structured Ms. Likewise, specifying the areas of biostatistics will guarantee not only the correct execution of the project, but also its application and reproducibility.

Keywords: protocol, methodology, research, design, biostatistics, sample size

Introducción

“Porque nada contribuye tanto a tranquilizar el espíritu como un propósito firme: un punto en el cual el alma pueda fijar su mirada intelectual”.

Mary Shelley (1818). *El Moderno Prometeo*.

La investigación se define como un proceso sistematizado mediante el cual, al seguir una serie de pasos de manera ordenada y objetiva, se resuelve una o varias preguntas específicas (Argimón-Pallas y Jiménez-Villa, 2019). En las ciencias médicas, y en las áreas naturales, las investigaciones se centran en profundizar conocimientos acerca de todas las esferas que componen al ser humano: desde la identificación de las causas biológicas de un proceso patológico, hasta la genera-

ción de nuevas propuestas que mejoren la atención médica (Argimón-Pallas y Jiménez-Villa, 2019; Torales y Barrios, 2023).

De acuerdo con lo anterior, los tipos de estudio más utilizados para la determinación de causas y frecuencias, o para la implementación de diseños experimentales, son las investigaciones clínicas, biomédicas y epidemiológicas (Kiani, 2022). Los estudios básicos o biomédicos usualmente analizan datos obtenidos en laboratorios, mientras que las investigaciones clínicas y epidemiológicas trabajan con poblaciones de pacientes (Hernández-Lomelí, 2006). No obstante, para iniciar cualquiera de estas investigaciones -y cumplir adecuadamente sus objetivos- se requiere redactar un documento que esquematice el plan de trabajo, teórico y metodológico, que se llevará a cabo (Simian, 2019).

A estos esquemas de trabajo se les conoce como Protocolos de Investigación (Pi) y se componen de tres elementos imprescindibles: el Marco Teórico (Mt), que incluye la información más relevante del tema de estudio y justifica su realización (Jundi, 2016). Después continúa el Apartado Metodológico (Am), sección que, al redactarse en tiempo futuro, presentará la metodología que se aplicará a lo largo del proyecto. Finalmente, el Marco Operativo (Mo) describirá tanto la calendarización del Pi, así como el número de recursos humanos y tecnológicos que se usarán durante la investigación (Argimón-Pallas y Jiménez-Villa, 2019).

Aunque cada apartado del Pi es indispensable para la realización de una investigación, es la sección del Am una de las más importantes, ya que da respuesta a “¿cómo se cumplirán los objetivos de la investigación...?”, “¿en quiénes se harán...?” y “¿en dónde se realizarán...?” (Jundi, 2016). Dado que este apartado expone elementos esenciales, tales como la definición de las unidades de observación, así como el plan de análisis estadístico (Diario Oficial de la Federación, 2024), su inadecuada planificación afectará no solo la ejecución de la investigación, sino también la validez de sus hallazgos o su futura replicabilidad (Kiani, 2022).

Igualmente, una de las principales causas por las cuales un Pi puede ser rechazado por un comité evaluador es su falta de precisión metodológica en su contenido (Arroyo-Hernández y Alarco, 2022; Hernández-Muñoz *et al.*, 2024a). Si se considera esto último, entonces se vuelve indispensable conocer no solo los elementos que sustenten la metodología de un proyecto, sino también los diferentes tipos de análisis que, al momento de aplicarse, garanticen la correcta aplicabilidad de la investigación

(Kiani, 2022). Por lo tanto, el objetivo del presente manuscrito consiste en describir las etapas para la elaboración del Am en Pi de tipo clínicos, biomédicos y epidemiológicos.

Metodología

Para cumplir el objetivo del manuscrito, se realizó una búsqueda no sistemática en la base de datos *PubMed*, así como en el motor de búsqueda *Google Académico*. Se identificaron fuentes primarias, principalmente artículos de revisión y capítulos de libro, las cuales describieran elementos propios de metodología y bioestadística en áreas clínicas, epidemiológicas y biomédicas. No obstante, dada las características narrativas del presente manuscrito, no se realizó ningún proceso de exclusión o tamizaje con la información encontrada (Ramírez-García, 2020; Sukhera, 2022).

La información expuesta a continuación está presentada de manera narrativa, siguiendo la propuesta metodológica sugeridas por Sukhera, así como por Hernández-Muñoz para revisiones de la literatura (Hernández-Muñoz *et al.*, 2024b; Sukhera, 2022). Asimismo, para redactar las etapas metodológicas se tomaron en cuenta las recomendaciones propuestas por Ciolino para las investigaciones biomédicas (Ciolino *et al.*, 2021), junto con la estructura de la Norma Técnica 313 para proyectos clínicos-epidemiológicos en territorio mexicano (Diario Oficial de la Federación, 2024).

Resultados

La importancia del Marco Teórico en la planeación del Apartado Metodológico

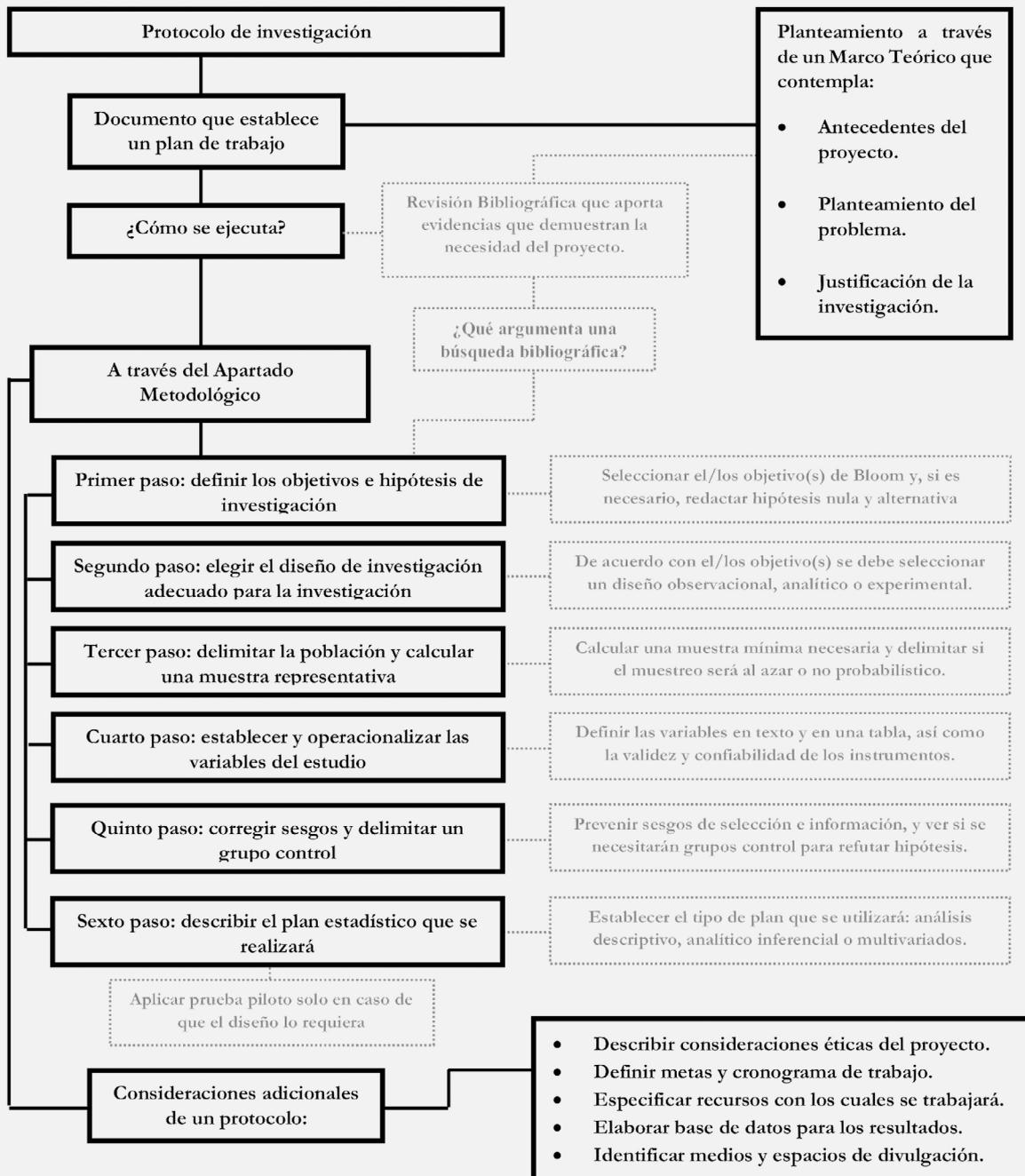
Un Pi debe iniciar con el Mt, el cual brindará una visión sintetizada del tema de interés (ver Diagrama de Flujo 1). La Norma Técnica 313, utilizada como un estándar para investigaciones mexicanas, refiere que este apartado resalta las evidencias teóricas más relevantes sobre el Pi (Diario Oficial de la Federación, 2024). Esta información, encontrada a través de una previa revisión bibliográfica (Hernández-Muñoz *et al.*, 2022), demuestra la necesidad del proyecto y argumenta los *Objetivos*, *Hipótesis* y *Diseño de Investigación* (Bonet-Collazo *et al.*, 2023; Hernández-Muñoz *et al.*, 2024a).

El primer apartado del Mt, *Antecedentes*, describe los hallazgos teóricos más sobresalientes del tema de interés (Ramírez-García, 2020). Por otro lado, la sección de *Planteamiento del Problema* delimita una pregunta que deberá resolverse al iniciarse la investigación (Rizo-Curie *et al.*, 2017), mientras que

el apartado de *Justificación* expone la magnitud y trascendencia del problema, así como los beneficios del proyecto. No obstante, aunque antes del Am se encuentran *Objetivos e Hipótesis* (Diario Oficial de la Federación, 2024), los mencionaremos dentro de los siguientes pasos dado que son indispensables para la elección del *Diseño de Investigación* y el *Plan de Análisis Estadístico*.

Diagrama de Flujo 1

Elementos de un Protocolo de Investigación para su correcta realización.



Fuente: elaboración propia.

Primer paso: definir los Objetivos e Hipótesis de la investigación

Los *Objetivos* son las metas por cumplir a lo largo de la investigación, clasificándose en generales y específicos: los primeros serán aquellos que proporcionarán el motivo de la investigación, enlazando el *Planteamiento del Problema* con las *Hipótesis*, mientras que los segundos atenderán aspectos concretos del proyecto (Manterola, 2013). Para su redacción se recomienda utilizar los niveles cognitivos de la taxonomía de Bloom pues, dependiendo de su nivel, estructurarán el proyecto y permitirán la elección del *Diseño de Investigación* (Peñaloza-Carreón et al., 2022).

Por otro lado, las *Hipótesis* serán suposiciones a futuro las cuales, al establecer una comparación entre la población de interés y un grupo control, permitirán la conclusión de que los futuros hallazgos sean certeros o sean resultado del azar. Dependiendo del *Diseño de Investigación*, se pueden tener varias o ninguna hipótesis en absoluto. Por ejemplo, reportes de casos y estudios transversales no requerirán de hipótesis, pues al ser los únicos *Diseños* que no tienen un grupo control comparativo, no es posible probar la veracidad de sus argumentos (Ciolino et al., 2021; Hernández-Muñoz et al., 2024a).

Si el *Diseño* requiriese de una *Hipótesis*, se redactará una *Hipótesis Nula* (H_0), la cual describirá que la población de interés no tendrá diferencia con el grupo control, así como una *Hipótesis Alternativa* (H_1) que referirá lo contrario. Ambas hipótesis tendrán un valor estándar de probabilidad (p) de significancia estadística ($H_0 = p \geq 0.05$ o $H_1 = p < 0.05$), el cual servirá para identificar el azar o la certeza de los resultados (Celis De la Rosa y Labrada-Martagón, 2016). No obstante, hay que recordar que las *Hipótesis* deben coincidir con el *Planteamiento del Problema* (Ciolino et al., 2021).

Segundo paso: elegir el Diseño de Investigación adecuado

Como se comentó previamente, las investigaciones biomédicas estudian tejidos y moléculas, además de comprender y analizar procesos fisiopatológicos. Por otro lado, las investigaciones clínicas y epidemiológicas se enfocan en grupos humanos, identificando etiologías y determinando tasas poblacionales (Villasís-Keever y Miranda-Novales, 2016; Kiani, 2022). Es indispensable especificar cual será el tipo de investigación que se realizará, pues este determinará tanto el tipo de *Diseño de Investigación*, como el *Plan de Análisis Estadístico* que se aplicará (Hernández-Muñoz et al., 2024a).

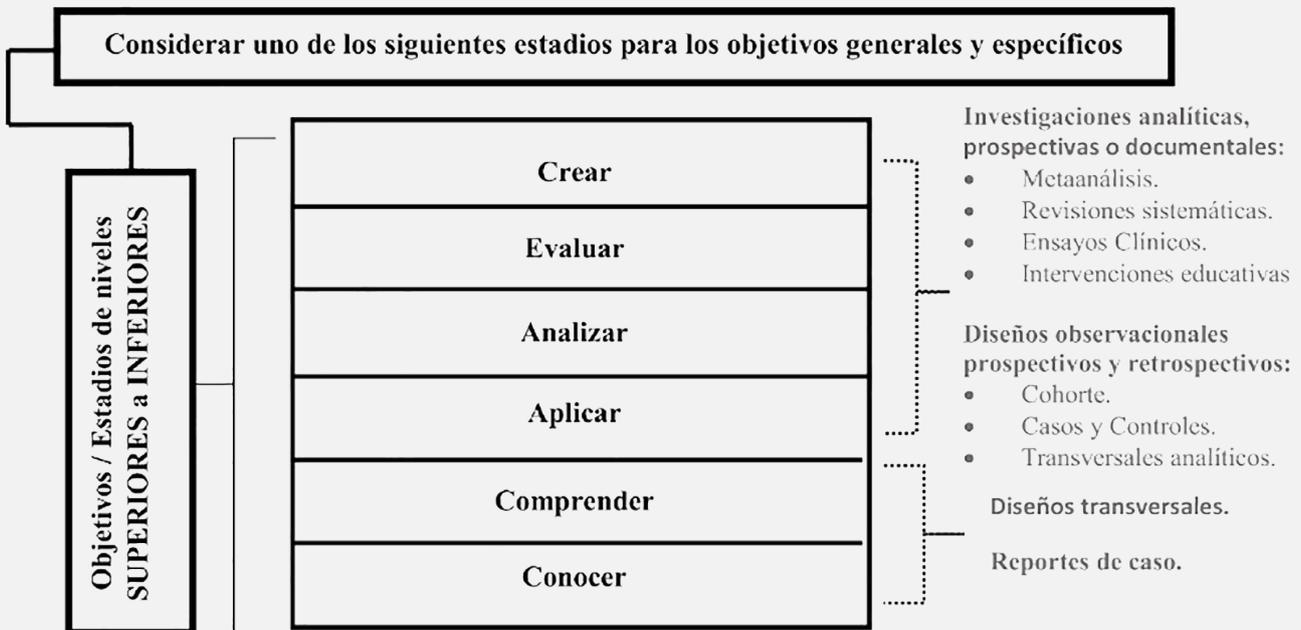
Los *Diseños* observacionales incluyen los estudios de cohorte, las investigaciones retrospectivas de casos y controles,

los informes epidemiológicos transversales, y los reportes de caso (Celis De la Rosa y Labrada-Martagón, 2016; Hernández-Muñoz, Hernández-Muñoz y Mata-Maqueda, 2018). Por otra parte, *Diseños* prospectivos como los ensayos clínicos, o las intervenciones de tipo educativas, comunitarias o psicosociales se denominarán experimentales -pseudoexperimentales en el caso de los estudios de intervención (Argimón-Pallas y Jiménez-Villa, 2019; Saltzman, 2022).

Es importante recordar que el *Objetivo General* precisará el *Diseño de Investigación* del Pi (ver Diagrama de Flujo 2). La selección de estadios cognitivos de Bloom tales como *crear*, *evaluar*, *analizar* o *aplicar* orientarán al uso de *Diseños* ya sea experimentales, pseudoexperimentales, prospectivos o retrospectivos -o a revisiones sistemáticas y metaanálisis. Por otro lado, estudios transversales o de reportes de caso, donde no hay un grupo control, son más específicos para *objetivos* como *conocer* o *comprender* (Albavera-Hernández et al., 2021; Hernández-Muñoz et al., 2024a).

Diagrama de Flujo 2

Objetivos de la taxonomía de Bloom y su vínculo con los diseños de investigación.



Fuente: elaboración propia.

Tercer paso: delimitar la población y calcular una muestra representativa

Considerando el *Diseño de Investigación*, así como la variable de respuesta que se intentará medir, es indispensable definir el universo de trabajo (N) sobre el cual se realizarán observaciones y de donde se obtendrá una muestra (n) representativa. Para cumplir esta representatividad se debe especificar la cantidad de sujetos que serán parte del estudio, realizándose por medio de cálculos precisos en programas de análisis estadístico como SPSS o Epi Info, o en páginas de cálculo de acceso abierto como *Open Epi* (Celis de la Rosa y Labrada-Martagón, 2016; Sontakke y Bhanarkar, 2022).

Los criterios de representatividad también dependen de que se especifique cual será el método de selección de la muestra. Esta recolección, o *muestreo*, puede ser por medio de métodos probabilísticos en donde todos los sujetos serán seleccionados de maneras aleatorias (Celis de la Rosa y Labrada-Martagón, 2016; Sontakke y Bhanarkar, 2022). Otros métodos de muestreo no dependientes del azar son las recolecciones a conveniencia, la selección por medio de casos consecutivos, o la identificación en “*cascada de nieve*” (Berndt, 2020; Celis de la Rosa y Labrada-Martagón, 2016).

De igual forma es importante especificar cuáles serán los *criterios* para incluir, excluir o eliminar los sujetos del estudio (Blasini *et al.*, 2020). Hay que recordar que los *criterios de exclusión* no se referirán a la ausencia de *criterios de inclusión*, sino a situaciones adicionales que, de no evitarse, podrían generar sesgos en los resultados (Patino y Ferreira, 2018). Finalmente, los *criterios de eliminación* solo se aplicarán para diseños prospectivos o experimentales, donde haya pérdidas a lo largo de la realización del proyecto (Hernández-Muñoz *et al.*, 2024a).

Cuarto paso: identificar y operacionalizar las variables del estudio

El siguiente paso será definir los tipos de *variables* que se utilizarán durante el Pi. Como tal, una *variable* se define como las características o atributos que se les da a los elementos del universo de trabajo, y que pueden cambiar dependiendo de su tipo de expresión (Celis de la Rosa y Labrada-Martagón, 2016). Al momento de redactar el Pi, en términos de causalidad, correlación o vinculación, las *variables* se deberán clasificar en dependiente e independientes, donde estas últimas afectarán la magnitud y el efecto de la primera (Saluja y Modi, 2021; Rizo-Curie *et al.*, 2017).

Por otro lado, si la información se expresará en tasas, frecuencias o porcentajes, entonces dichas variables se deberán denominar como *cualitativas*. En caso de utilizar medidas de

tendencia central, como es el promedio y la desviación estándar, entonces se denominarán como *variables cuantitativas* (Rizo-Curie *et al.*, 2017). Recordando a su vez, que estas variables tienen su propia escala de medición, siendo categóricas o dicotómicas al ser *cualitativas*, así como continuas y discretas en el caso de las *cuantitativas* (Celis de la Rosa y Labrada-Martagón, 2016).

Las definiciones conceptuales y operativas de las *variables*, así como sus escalas de medición, deberán exponerse en una *tabla de operacionalización* (Cárdenas de Baños *et al.*, 2021; Coronel-Carvajal, 2023). De igual forma, se deberán describir los métodos de recolección de información: en caso de pruebas diagnósticas, se especificará su grado de validez por medio de sus valores de sensibilidad, especificidad y valores predictivos. Por otro lado, si se utilizarán encuestas o inventarios, se deberá reportar sus valores de confiabilidad (Argimón-Pallás y Jiménez-Villa, 2019).

Quinto paso: corregir sesgos y delimitar un posible grupo control

Un error es cualquier discordancia inherente del proceso de investigación que afectará la validez externa e interna del estudio, por ende, su replicabilidad. Al repercutir en la calidad del Pi, deberán ser anticipados y, de ser posible, corregidos antes de iniciar el proyecto (Barraza *et al.*, 2019). Pueden ser *errores no sistemáticos*, cuando el azar generará una variabilidad en los sujetos del estudio, evitándose al aumentar el tamaño de la muestra o repitiendo el mismo método de recolección de la información (Argimón-Pallas y Jiménez-Villa, 2019; Villasís-Keever *et al.*, 2018).

Por su parte, los *errores o sesgos sistemáticos* se presentan durante el desarrollo de la investigación: uno de ellos, el *sesgo de selección*, acontece al seleccionar inadecuadamente la muestra o al haber pérdidas significativas de la población (Argimón-Pallas y Jiménez-Villa, 2019). El otro tipo de sesgo, o *sesgo de medición*, se presenta durante la etapa de recolección de información, ya sea por inconsistencias al momento de recolectar la información o por uso de instrumentos con grados inferiores de validez o confiabilidad (Zurita-Cruz y Villasís-Keever, 2021)

Finalmente, el *sesgo de confusión* es la combinación de los dos sesgos anteriores, teniendo un carácter multifactorial. Se desarrolla bajo el contexto de concluir erróneamente la presencia de asociaciones o correlaciones o, en su defecto, afirmar que no existen. Este tipo de errores se deben a la presencia

de *variables confusoras*, y una de las medidas para evitarlas antes de que inicie el Pi, es el uso de un grupo control, similar o pareado con la población de interés -aunque es importante recordar que no todos los Diseños requieren de grupos control (Quispe, Álvarez-Valdivia y Loli-Guevara, 2020).

Sexto paso: describir el tipo de análisis y método estadístico que se realizará

Por último, se deberá especificar el tipo de análisis estadístico (ver Tabla 1). Cuando solo se presentarán los datos de manera textual y gráfica, se conoce como plan de *análisis univariado* o *estadística descriptiva*. Por otro lado, si se requiriese comprobar hipótesis, se especificará un plan *bivariado* o *estadística analítica inferencial*, pues permitirá la comparación de grupos, la identificación de correlaciones, o incluso la determinación de asociaciones, dependiendo del tipo de variable (Celis de la Rosa y Labrada-Maratagón, 2016).

Los *análisis inferenciales* deberán acompañarse de su respectiva prueba de significancia estadística, la cual generará un valor de p que, si es menor que el de la H_0 (≥ 0.05), permitirá descartar la presencia del azar. Por ejemplo, si se compararán datos *cuantitativos* y se tendrá solo un grupo control, se especificará el uso de t de *Student*; si serán más de dos grupos, se utilizará ANOVA. Por otro lado, la determinación de asociaciones empleará *Chi cuadrado* (χ^2) o prueba exacta de Fisher, mientras que análisis de correlación necesitarán su comprobación con R^2 (Argimón-Pallás y Jiménez-Villa, 2019).

Tabla 1

Principales pruebas estadísticas descriptivas, inferenciales y multivariadas que se pueden usar en un Pi.*

Objetivo	Variables Cuantitativas		Variables Cualitativas
	Pruebas <i>paramétricas</i> para poblaciones con distribución normal o simétrica.	Pruebas <i>no paramétricas</i> para poblaciones con distribución anormal o asimétrica.	Pruebas donde se comparan exclusivamente variables cualitativas.
Análisis estadístico descriptivo cuando solo hay una muestra y/o variable			
Describir y graficar la información.	<input type="checkbox"/> Promedios <input type="checkbox"/> Desviación estándar	<input type="checkbox"/> Mediana. <input type="checkbox"/> Rangos.	<input type="checkbox"/> Frecuencias. <input type="checkbox"/> Porcentajes. <input type="checkbox"/> Tasas.
Análisis estadístico inferencial para identificar asociaciones/correlaciones en dos o más muestras y/o variables			
Cuantificar un vínculo de asociación, o de correlación, entre una variable dependiente y una o varias variables independientes.	Correlación (R^2) de <i>P de Pearson</i> , mide el grado en que una variable afecta la magnitud de otra.	Correlación (R^2) de <i>Rho de Spearman</i> , mide el grado en que una variable afecta la magnitud de otra.	<input type="checkbox"/> <i>Riesgo Relativo</i> : mide la magnitud que tiene un riesgo. <input type="checkbox"/> <i>Odds Ratio</i> : mide el grado de asociación de factores de riesgo.

Análisis estadístico inferencial para obtener valores de p^{*} e IC95%******

Comparar la población de interés contra un grupo control.	t de <i>Student</i> , la cual compara dos muestras y obtiene la diferencia de sus promedios.	U de Mann-Whitney o prueba de Wilcoxon para menos de 6 a 25 sujetos.	<input type="checkbox"/> Prueba de <i>Chi Cuadrado</i> (χ^2) para identificar la significancia de análisis de asociación.
Comparar la población de interés contra más de un grupo control.	ANOVA** compara más de dos muestras y obtiene la diferencia de sus varianzas.	Kruskal-Wallis es una prueba alternativa al ANOVA, pero para muestras asimétricas	<input type="checkbox"/> Prueba exacta de Fisher, similar a la anterior, pero para muestras pequeñas. <input type="checkbox"/> Prueba de McNemar para grupos pareados o similares.

Análisis estadístico multivariado para identificar variables confusoras y valores ajustados

Identificar variables confusoras y obtener valores ajustados.	Regresión lineal múltiple.	Regresión lineal no paramétrica.	Regresión logística múltiple
---	----------------------------	----------------------------------	------------------------------

*Pi: Protocolo de investigación, **ANOVA: Análisis de Varianza, ***p: valor de significancia estadística, ****IC95%: Intervalos de Confianza al 95%

Nota: esta tabla es un resumen de las pruebas más utilizadas; sin embargo, es necesario indicar que existen otras pruebas no paramétricas como prueba de Friedman y Tau de Kendall para variables cuantitativas, al igual que Q de Cochran para variables cualitativas categóricas con más de un grupo control.

Igualmente, las pruebas de significancia nos ofrecerán *Intervalos de Confianza al 95% (IC95%)*, los cuales son rangos que determinarán las probables ubicaciones numéricas de los valores obtenidos en los análisis inferenciales. No obstante, si se buscara identificar probables variables de *confusión* que no se pudieron prevenir en las etapas tempranas del protocolo, se recomienda especificar el uso de *estadística analítica multivariada*: modelos matemáticos de regresiones lineales *cuantitativas*, o logísticas para datos *cualitativos* (Celis de la Rosa y Labrada-Martagón, 2016).

La *estadística multivariada* ofrecerá nuevos valores ajustados de asociación, correlación, IC95% y de p , siendo útil para determinar de manera más precisa la presencia de certeza estadística. Sin embargo, antes de iniciar, es importante describir que pruebas de significancia estadística se utilizarán en caso de que la población no siga una distribución normal o *paramétrica*. Para ello es importante especificar que los resultados se someterán a pruebas de Kolmogorov-Smirnov si son muestras pequeñas, o de Shapiro-Wilk si son más de 500 sujetos (Dominguez-Lara, 2018).

Reflexiones finales

Elementos adicionales de un protocolo que se deben atender

Otros elementos mencionados por la Norma Técnica 313 serán el método en como se recolectará la información, así como el uso de pruebas piloto en caso de que se apliquen encuestas (Diario Oficial de la Federación, 2024). A su vez es importante especificar que el Pi será sometido ante un comité de ética, detallando cómo se respetará la autonomía y confidencialidad de los sujetos de estudio, protegiéndolo ante cualquier probable riesgo y tomando como referencia principios éticos propios de la Declaración de Helsinki, al igual que de la Ley General de Salud (Sontakke y Bhanarkar, 2022).

Igualmente, es importante considerar que al momento de que inicie el proyecto de investigación, se necesitará una base de datos en donde se irán guardando los resultados (Jeong, Lara y Ávila, 2024). Con base a la *tabla de operacionalización* se recomienda preparar una hoja de cálculo en donde se vayan almacenando los resultados. Para que la información sea comprensible, se recomienda el uso de códigos para las variables *cualitativas*, mientras que las variables *cuantitativas* se podrán guardar sin la necesidad de codificación (Celis de la Rosa y Labrada-Maratagón, 2016).

Asimismo, se deberán precisar en el Mo los recursos y posibles las fuentes de financiamiento a los cuales se tendrá acceso, mencionando a su vez las metas a cumplir y sus probables fechas de cumplimiento. Esto último se puede realizar por medio de un cronograma o *diagrama de Grant*, en el cual se contemplarán los ejes teóricos, metodológicos y asistenciales del protocolo (Montero-González *et al.*, 2024). Recordando que esto es con el fin de que se pueda planear la adecuada culminación en tiempo y forma del Pi (Gutiérrez-López y Rodríguez-Reyna, 2022).

Errores estadísticos durante el análisis de los datos que se pueden prevenir

Es importante tener presente probables errores que podrían aparecer al ya haber iniciado el Pi, y estar trabajando ya con los datos del proyecto. Existen los *errores Tipo I* o *Alfa* (α), que acontecen al rechazar la H_0 ($p \geq 0.05$) al obtener erróneamente asociaciones, correlaciones o diferencias entre la población de estudio y el grupo control. Este error sucede cuando, al analizar los resultados, se utilizan pruebas no específicas de *análisis estadístico inferencial* que nos den valores de p significativos, pero que no son certeros ni exentos del azar (Rendón-Macías, Zarco-Villacencio y Villasís-Keever, 2021).

Por otro lado, los errores *tipo II* o *Beta* (β) sucederán cuando, a pesar de que si hubo diferencias contra el grupo comparativo, se termina rechazando la H_1 ($p < 0.05$). A pesar de que estos errores acontecerán hasta que se analicen los datos del P_i , se pueden prevenir desde las etapas del M_t : la precisión en el cálculo de la muestra, y en los $IC_{95\%}$, evitará errores tipo II. Por otro lado, el uso de pruebas de significancia precisas -que ofrezcan valores de p específicos- prevenirán los de tipo I (Celis de la Rosa y Labrada-Maratagón, 2016; Rendón-Macías, Zarco-Villacencio y Villasís-Keever, 2021).

Finalmente, es importante resaltar que los P_i dentro del campo clínico-epidemiológico conllevarán a la mejoría en la toma de decisiones médicas. Por su parte, las investigaciones biomédicas mantendrán sus respectivos campos a la vanguardia, permitiendo una actualización al personal de salud (Otzen *et al.*, 2017). Por ende, no solo es importante planificar la metodología estadística que se empleará, sino también elegir correctamente el tipo de investigación que se utilizará (Hannah, 2022), pues este dirigirá el enfoque ontológico y epistemológico que tendrá el proyecto.

Fortalezas, debilidades y reflexiones finales del manuscrito

El presente artículo sirve como una guía para la elaboración de la sección metodológica de un protocolo, así como de una revisión de los principales elementos de bioestadística que deben de contemplarse. A pesar de ello, al ser un documento de revisión narrativa, o de revisión no sistemática, una de sus principales debilidades es que no se realizó un análisis comparativo de la información, ni tampoco se hizo una descripción detallada de cada uno de los elementos presentados a lo largo del manuscrito (Hernández-Muñoz *et al.*, 2024b).

No obstante, al considerar la importancia que tiene la producción y divulgación de nuevos conocimientos en áreas médicas y naturales (Regalado-Miranda *et al.*, 2023), entonces nuestro manuscrito tiene la fortaleza de presentar una guía que, a manera de lista de cotejo, muestra los elementos que los proyectos clínicos y biomédicos deben contemplar. Al conocer y aplicar los principales elementos metodológicos que un P_i debe de tener, se puede asegurar la validez y replicabilidad de los resultados en áreas médicas y naturales.

Conclusión

La aceptación de un protocolo de investigación se deberá a un A_m bien estructurado, por lo que una de las principales

dificultades en la realización de proyectos de investigación se encuentra tanto en el sustentamiento de su metodología, como en la correcta planificación de los análisis que se ejecutarán. Para ello es importante establecer una metodología orientada en un marco teórico interdisciplinario que precise los objetivos específicos con problemáticas de atención clínica. Por lo tanto, el correcto cumplimiento de cada uno de los elementos metodológicos, previamente mencionados, podrá garantizar la aplicación de los resultados en nuevas investigaciones médicas.

Contribución de los autores

AEHM y SNMM idearon la temática del manuscrito. El trabajo colectivo entre AEHM, SNMM, SUG y MPMF permitió la redacción del manuscrito. LMAR y JAA auxiliaron en la realización de diagramas y tablas, así como en la corrección de las referencias bibliográficas. Finalmente, IAGA y RMGS auxiliaron con la revisión final del manuscrito.

Agradecimientos

Se agradece la participación de la Dra. Ana Jimena Mendoza-Godínez, la Dra. Samantha Michelle Morgado-Ramírez y la Dra. Paola Jazmín Uribe-Ramos en la selección del epígrafe para el manuscrito.

Dedicatoria

Este manuscrito es dedicado a las y los estudiantes que han requerido de mis consejos para sus protocolos, así como a colegas en áreas de investigación con los cuales o he laborado o han solicitado de mi opinión. Esta breve guía es una síntesis de lo que he aprendido durante mi formación académica, la cual espero sea un apoyo en la precisión y estandarización de sus futuros proyectos de investigación.

Dr. Adrián E. Hernández Muñoz, diciembre del 2024.

Abreviaturas (En orden de aparición)

Pi: Protocolo de investigación.

Mt: Marco teórico.

Am: Apartado metodológico.

Mo: Marco operativo.

H_0 : Hipótesis Nula.

H_1 : Hipótesis Alternativa.

p : Valor de probabilidad de significancia estadística.

$p \geq 0.05$: Valor de significancia estadística de la hipótesis nula.

$p < 0.05$: Valor de significancia estadística de la hipótesis alternativa.

Referencias

- Albavera-Hernández, C., Rodríguez-Rojas, S., García Orihuela, I., Baltazar Morales, S., & Meza Rodríguez, A. (2021). ¿Cómo realizar un proyecto de investigación? *Revista de Educación e Investigación en Emergencia*, 3(3), 162-173. <https://doi.org/10.24875/REIE.21000052>
- Argimón Pallás, J. y Jimenez Villa, J. (2019). *Métodos de investigación clínica y epidemiológica*. Barcelona, España: Elsevier.
- Arroyo-Hernández, H., & Alarco, J. J. (2022). El destino de los artículos originales rechazados. Análisis en una revista de salud pública en Latinoamérica. *Revista del Cuerpo Médico Hospital Nacional Almanzor Aguinaga Asenjo*, 15(4), 535-540.
- Barraza, F., Arancibia, M., Madrid, E., & Papuzinski, C. (2019). Conceptos generales en bioestadística y epidemiología clínica: error aleatorio y error sistemático. *Medwave*, 19(07). <http://doi.org/10.5867/medwave.2019.07.7687>
- Berndt, A. E. (2020). Sampling methods. *Journal of Human Lactation*, 36(2), 224-226. <https://doi.org/10.1177/0890334420906850>
- Blasini, R., Buchowicz, K. M., Schneider, H., Samans, B., & Sohrabi, K. (2023). Implementation of inclusion and exclusion criteria in clinical studies in OHDSI ATLAS software. *Scientific Reports*, 13(1). [10.21203/rs.3.rs-2985787/v1](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2985787/v1)
- Bonet Collazo, O., Mazot Rangel, A., Casanova González, M., & Cruz Pérez, N. R. (2023). Proyecto de investigación y tesis. Guía para su elaboración. *MediSur*, 21(1), 274-288.
- Cárdenas de Baños, L., González-García, S., Bencomo García, D., Cruz Segundo, R., Valladares Baena, A., & Jimenez Rodriguez, D. (2021). Caracterización preliminar de los protocolos de investigación de residentes de Ciencias Médicas. *Revista Cubana de Reumatología*, 23(1).
- Celis de la Rosa, A., & Labrada-Martagón, V. (2016). *Bioestadística*. Editorial El Manual Moderno.
- Ciolino, J. D., Spino, C., Ambrosius, W. T., Khalatbari, S., Cayetano, S. M., Lapidus, J. A., Nietert, P. J., Oster, R. A., Perkins, S. M., Pollock, B. H., Pomann, G. M., Price, L. L., Rice, T. W., Tosteson, T. D., Lindsell, C. J., & Spratt, H. (2021). Guidance for biostatisticians on their essential contributions to clinical and translational research protocol review. *Journal of clinical and translational science*, 5(1). <https://doi.org/10.1017/cts.2021.814>
- Coronel-Carvajal, C. (2023). Las variables y su operacionalización. *Revista Archivo Médico de Camagüey*, 27.
- Diario Oficial de la Federación. (2024). Norma Técnica Número 313. Para la presentación de proyectos e informes técnicos de investigación en las instituciones de atención a la salud. Normas Técnicas, (jalisco.gob.mx).

- Dominguez-Lara, S. (2018). Magnitud del efecto para pruebas de normalidad en investigación en salud. *Investigación en educación médica*, 7(27), 92-93. <https://doi.org/10.22201/fac-med.20075057e.2018.27.1776>
- Gutiérrez López, J. I., & Rodríguez Reyna, R. (2022). Una mirada crítica a los trabajos de terminación de la especialidad en Medicina General Integral. *Humanidades Médicas*, 22(1), 148-160.
- Hanna, M. (2019). *How to write better medical papers*. EE.UU.: Springer.
- Hernández-Lomelí, A. (2006). Diseños de investigación. En Vega-Malagón, G. *Metodología de la investigación clínica y epidemiológica* (pp. 103-113). Querétaro, México: FUNDAp.
- Hernández-Muñoz, A. E., Hernández-Muñoz, K. M., & Mata-Maqueda I (2018). Características, ventajas y limitantes en las variantes metodológicas de los casos y controles: artículo de revisión narrativa. *Digital Ciencia@UAQRO*, 11(1), 110-122.
- Hernández-Muñoz, A. E., Rangel-Alvarado, M. Á. A., Torres-García, L., Hernández-Martínez, G., Castillo-Ixta, P. K., Olivares-Moreno, L. L. & Sánchez-Morales, A. G. (2022). Proceso para la realización de una revisión bibliográfica en investigaciones clínicas. *Digital Ciencia@UAQRO*, 15(1), 50-61.
- Hernández-Muñoz A. E., Rangel-Alvarado M. A., Lomelí-Olguín D., Herrera-Hernández E., Ugalde-Barrón S., Navarro-Ruiz N.E., & Hernández-Muñoz K. M. (2024a). Elaboración y redacción de un artículo científico en áreas médicas: recomendaciones metodológicas y narrativas para su publicación. *Digital Ciencia@UAQRO*, 17(1), 65-78: <https://doi.org/10.61820/dc.v17i1.1326>
- Hernández-Muñoz, A. E., Ugalde-Barrón, S., Ramírez-Mendoza, D.I., Soriano-Pérez, T. Maciel-Caracoza, E. Y., Pérez-Pérez, A., & López-Zapata, V.E. (2024b). Tipos de revisiones de la literatura en las investigaciones clínicas: ventajas y utilidades en áreas de investigación y en el campo clínico. *Nthe*, 45(1), 26-34. <https://doi.org/10.35434/rcmhnaaa.2022.154.1548>
- Jeong, S. H., Lara, L. P. F., & Ávila, J. M. J. (2024). Cómo construir una base de datos. *Cirugía de Columna*, 2(3), 194-198.
- Jundi, A. A. (2016). Protocol writing in clinical research. *Journal of Clinical and Diagnostic Research: JCDR*, 10(11). <https://doi.org/10.7860/jcdr/2016/21426.8865>
- Kiani, A. K., Naureen, Z., Pheby, D., Henehan, G., Brown, R., Sieving, P., & International Bioethics Study Group. (2022). Methodology for clinical research. *Journal of preventive medicine and hygiene*, 63(2 Suppl 3).
- Manterola, C., & Otzen H, T. (2013). Porqué Investigar y Cómo Conducir una Investigación. *International Journal of Morphology*, 31(4), 1498-1504. <https://doi.org/10.4067/s0717-95022013000400056>

- Montero González, T., de Mendoza Amat, J. H., & García Vega, E. (2024). La ciencia desde la asistencia médica. *Revista Cubana de Medicina Militar*, 53(1).
- Otzen, T., Manterola, C., Rodríguez-Núñez, I., & García-Domínguez, M. (2017). La necesidad de aplicar el método científico en investigación clínica: Problemas, beneficios y factibilidad del desarrollo de protocolos de investigación. *International Journal of Morphology*, 35(3), 1031-1036. <https://doi.org/10.4067/s0717-95022017000300035>
- Patino, C. M., & Ferreira, J. C. (2018). Inclusion and exclusion criteria in research studies: definitions and why they matter. *Jornal Brasileiro de Pneumologia*, 44, 84-84. <https://doi.org/10.1590/s1806-37562018000000088>
- Peñaloza-Carreón, J. E., Mayorga-Ponce, R. B., & Roldan-Carpio, A. (2022). Correcto uso de la Taxonomía de Bloom para desarrollar objetivos. *Educación Y Salud Boletín Científico Instituto De Ciencias De La Salud*, 11(21), 63-65. <https://doi.org/10.29057/icsa.v11i21.9779>
- Quispe, A. M., Alvarez-Valdivia, M. G., & Loli-Guevara, S. (2020). Metodologías Cuantitativas 2: Sesgo de confusión y cómo controlar un confusor. *Revista del Cuerpo Médico Hospital Nacional Almanzor Aguinaga Asenjo*, 13(2), 205-212. <https://doi.org/10.35434/rcmhnaaa.2020.132.675>
- Ramírez-García, A. G. (2020). Estudios de posgrado y elaboración de artículos científicos. *Utopía y praxis latinoamericana: Revista Internacional de Filosofía Iberoamericana y Teoría Social*, (11), 300-315. <http://doi.org/10.5281/zenodo.4278373>
- Regalado Miranda, E. R., Ferrer Arrocha, M., Alonso Martínez, M. I., & Ortega Castro, M. K. (2023). Impacto de la maestría en la formación investigativa de sus egresados a través de sus publicaciones. *Educación Médica Superior*, 37(3).
- Rendón-Macías, M. E., Zarco-Villavicencio, I. S., & Villasís-Keever, M. Á. (2021). Métodos estadísticos para el análisis del tamaño del efecto. *Revista Alergia México*, 68(2), 128-136.
- Rizo-Curiel, G., Salas-Salazar, L., Ramírez-Contreras, M. G., González-Ramírez, L. P., & Martínez-Arriaga, R. J. (2017). Protocolo de investigación para profesionales de la salud. *Acta de Ciencia en Salud*, (3), 63-71.
- Saltzman, C. (2022). New FAI Guidelines: Strobe, Moose, Prisma, Consort. *Foot & Ankle International*, 43(1), <https://doi.org/10.1177/10711007211063029>
- Simian, P. B. M. C. (2019). Planificación y factibilidad de un proyecto de investigación clínica. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 30(1), 8-18. <https://doi.org/10.1016/j.rmcl.2018.12.004>

- Sontakke, Y. A., & Bhanarkar, U. P. (2022). Steps in writing a research protocol for thesis. *Cosmoderma*, 2(20), 1-5. https://doi.org/10.25259/csdm_12_2022
- Sukhera, J. (2022). Narrative reviews: flexible, rigorous, and practical. *Journal of graduate medical education*, 14(4), 414-417. <https://doi.org/10.4300/jgme-d-22-00480.1>
- Torales, J., & Barrios, I. (2023). Diseño de investigaciones: algoritmo de clasificación y características esenciales. *Medicina clínica y social*, 7(3), 210-235. <https://doi.org/10.52379/mcs.v7i3.349>
- Villasís-Keever, M. Á., & Miranda-Navales, M. G. (2016). El protocolo de investigación II: los diseños de estudio para investigación clínica [The research protocol II: study designs in clinical research]. *Revista alergia Mexico*, 63(1), 80-90. <https://doi.org/10.29262/ram.v63i1.163>
- Villasís-Keever, M. Á., Márquez-González, H., Zurita-Cruz, J. N., Miranda-Navales, G., & Escamilla-Núñez, A. (2018). El protocolo de investigación VII. Validez y confiabilidad de las mediciones. *Revista Alergia México*, 65(4), 414-421. <https://doi.org/10.29262/ram.v65i4.560>
- Zurita-Cruz, J. N., & Villasís-Keever, M. Á. (2021). Principales sesgos en la investigación clínica. *Revista alergia México*, 68(4), 291-299. <https://doi.org/10.29262/ram.v68i4.1003>

Presencia de ansiedad y depresión en personas con diabetes tipo 2 y esclerosis múltiple en Querétaro, México

Anxiety and depression in persons with type 2 diabetes mellitus and multiple sclerosis in Querétaro, México

Bruno Eduardo Méndez Cruz*

Juan Carlos Solís Sáinz

Norma Angélica Rivera Villaseñor

Adriana Jheny Rodríguez-Méndez

Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México

Ana Laura Hernández Ledesma

Universidad Nacional Autónoma de México,

Laboratorio Internacional de Investigación sobre el Genoma Humano, Querétaro, México

Lilia Susana Gallardo Vidal

Instituto Mexicano del Seguro Social, Querétaro, México

* bmendez28@alumnos.uaq.mx

Fecha de recepción: 1 de septiembre del 2024

Fecha de aceptación: 25 de noviembre del 2024

Resumen

La prevalencia de ansiedad y depresión en pacientes con enfermedades crónicas no transmisibles es preocupante, dado que existe evidencia de que aumentan la gravedad de padecimientos como diabetes y enfermedades autoinmunes. Asimismo, se asocia a una menor respuesta a los tratamientos, aunque lamentablemente aún no hay estudios claros que mencionen cifras de prevalencia. Por este motivo se valoraron la ansiedad y la depresión en personas queretanas con Diabetes tipo 2 (DT2) y Esclerosis Múltiple (EM) diagnosticadas. Se evaluaron la ansiedad y la depresión sintomática mediante el Inventario de Ansiedad y Depresión de Beck en 20 pacientes, se realizó su valoración clínica y de marcadores bioquímicos en sangre con la finalidad de describir su estado de salud, así como su porcentaje de grasa corporal. En personas con DT2 se encontró una frecuencia baja de síntomas de ansiedad y depresión, a diferencia de las personas con EM, donde se detectaron más



indicios de ansiedad. En cuanto a las variables bioquímicas, se encontraron niveles considerablemente elevados de lipoproteínas de baja densidad (LDL) y lipoproteínas de alta densidad (HDL) en personas con EM, las cuales podrían asociarse con diversos factores, uno de ellos es la dieta, que podría estudiarse en futuras investigaciones, mientras que la lipoproteína de muy baja densidad (VLDL) fue mayor en DT2. Lo anterior indica un área de oportunidad y la necesidad en estos pacientes para que reciban apoyo psicológico y orientación nutrimental, oportunos y eficaces, así como estrategias que ayudarán a mejorar su calidad de vida.

Palabras clave: ansiedad, depresión, enfermedades crónicas, diabetes tipo 2, esclerosis múltiple

Abstract

The prevalence of anxiety and depression in patients with chronic diseases is of concern, since there is evidence that it increases the severity of conditions such as diabetes and autoimmune diseases and is associated with a lower response to treatments, although unfortunately there are no clear studies that mention prevalence data. For these reasons, anxiety and depression were evaluated in people from Querétaro with diagnosed type 2 Diabetes (T2D) and Multiple Sclerosis (MS). Anxiety and symptomatic depression were evaluated using Beck Anxiety Inventory and Beck Depression Inventory in 20 patients. Their clinical and blood biochemical markers were evaluated in order to describe their health status, as well as their body fat percentage. In people with TD2, a low frequency of anxiety and depression symptoms was found, unlike people with MS, where more anxiety symptoms were detected. Regarding biochemical variables, significantly elevated levels of low-density lipoprotein (LDL) and high-density lipoprotein (HDL) were found in people with MS, which could be associated with various factors such as diet, that could be studied in future research, meanwhile very low density lipoprotein (VLDL) was higher in TD2. This indicates an area of opportunity and the need for these patients to receive timely and effective psychological support and nutritional guidance, as well as strategies that will help them to improve their quality of life.

Keywords: anxiety, chronic diseases, depression, type 2 diabetes, multiple sclerosis

Introducción

Enfermedades crónicas no transmisibles

Las enfermedades crónicas no transmisibles (ECNT), también denominadas como “no contagiosas”, presentan una amplia gama de factores tales como la predisposición y periodos largos de latencia acompañados de una evolución lenta en la aparición de los síntomas, lo que ocasiona en los pacientes una disminución en las funciones físicas y metabólicas. Actualmente, las ECNT representan el 74% de las muertes a nivel mundial (Piovani *et al.*, 2022), y generalmente se consideran como incurables, además de ser enfermedades con tratamientos complejos y costosos. Todo lo anterior repercute de forma directa en el bienestar físico y mental de las personas con dichos padecimientos (Piovani *et al.*, 2022).

Dentro de las ECNT podemos enlistar varios ejemplos como la obesidad, Alzheimer, epilepsia, hipertensión, asma, hígado graso, diabetes mellitus, esclerosis múltiple, depresión, entre otras (Piovani *et al.*, 2022, Bazargan-Hejazi *et al.*, 2020). De acuerdo con el Estudio Nacional de Salud y Envejecimiento en México (ENASEM 2021), existe un consenso preocupante acerca de la prevalencia de enfermedades crónicas en la población mexicana, específicamente en el grupo de 53 años o más, donde encontramos que los padecimientos más comunes de este tipo son hipertensión arterial (43.3 %), diabetes (25.6 %) y artritis (10.7 %), seguido de enfermedades pulmonares, cáncer, infartos y embolias (Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI, 2023).

Factores de riesgo

Las ECNT comparten una naturaleza multifactorial resultado de la interacción de diversos componentes genéticos, metabólicos, ambientales y de estilo de vida. En México, en particular, se sabe que los factores ambientales y de estilo de vida son muy importantes y de alto impacto en la salud de la población. Debido a lo anterior, encontramos enfermedades con alta prevalencia como la DT2, y patologías con menor prevalencia como la EM. La comparación del impacto en la salud mental que estas patologías tienen en nuestra población se ha estudiado poco.

A nivel metabólico, para la DT2 existe un consenso general acerca del desarrollo de la enfermedad en personas con sobrepeso u obesidad, ya que, generalmente, esto provoca cambios en los niveles de glucosa (en ayuno ≥ 126 mg/dL y 2 hrs después de ingesta de 75 g de glucosa oral ≥ 200 mg/dL), hemoglobina glicada $> 6.5\%$, HDL (usualmente < 40 mg/dL), en triglicéridos > 150 mg/dL y LDL (generalmente > 200 mg/dL)

(Hidalgo-Villavicencio & Cañarte-Vélez, 2022; Jerez-Fernández *et al.*, 2022). En la EM se han documentado cambios a nivel metabólico, en parámetros de perfil de lípidos existe un incremento en sus concentraciones (Hernández-Ledesma *et al.*, 2020), lo cual condiciona el estado proinflamatorio y exacerba la presencia de síntomas relacionados con la activación del sistema inmunitario.

Algunos otros factores que predisponen a la fisiopatología de DT2 y EM tienen que ver con el estilo de vida y origen étnico, en este sentido, se destaca la falta de actividad física, la cual genera desbalances en los niveles de glucosa sanguínea (Hamasaki, 2016). De igual forma, existe un consenso acerca de la elevada prevalencia de la DT2 en poblaciones de origen asiático, latino y afroamericana en los Estados Unidos (Cheng *et al.*, 2019). Respecto a la EM, la prevalencia es mayor en poblaciones que viven cerca de los polos, donde los ciclos de luz son más cortos (Hernández-Ledesma *et al.*, 2021), lo cual se explica, parcialmente, por los bajos niveles de vitamina D. También existen datos que sugieren que la probabilidad de padecer DT2 y EM aumenta si se tienen antecedentes familiares directos de haber sufrido la enfermedad con anterioridad (Laakso & Fernandes-Silva, 2022).

En cuanto a factores de riesgo en EM, el consenso acerca de cómo varía la prevalencia respecto al sexo indica que afecta principalmente a mujeres entre 2 y 3 veces más que a los hombres (Honer *et al.*, 1987). Otro agente causal de esta patología puede ser la exposición y padecimiento de enfermedades con virus como Epstein-Barr, varicela-zoster, el virus humano de herpes 6, retrovirus endógeno humano o citomegalovirus, que pueden generar un estado inflamatorio crónico en el sistema nervioso central (Sedighi *et al.*, 2023). Por último, es importante mencionar la existencia de estudios que han documentado la posible relación entre niveles elevados de sodio con el desarrollo de EM, aunque permanece incierto el motivo (Brown, 2023).

Estudio en México de la diabetes tipo 2 y la esclerosis múltiple

En México, la DT2 ocupa los primeros lugares en prevalencia (Basto-Abreu *et al.*, 2023), causa de muerte y presencia de complicaciones (Sun *et al.*, 2022), con un total de 17.6 millones de personas que padecen la enfermedad, datos de acuerdo con la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición (ENSANUT) 2022. Se estima que un 10.3% de las personas mayores de 20 años tiene un diagnóstico de diabetes (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2021a). En el año 2021 representó el 13% del total de muertes en el país, de las cuáles el 74.9% corresponden a

DT2 que se caracteriza por una elevada concentración de glucosa en sangre debido a un defecto en la secreción y/o acción de la insulina de las células β en los islotes de Langerhans del páncreas. A nivel mundial, 529 millones de personas padecen diabetes, el 96% corresponden a DT2 (Ong *et al.*, 2023), y es la novena causa de muerte, con un estimado de un millón de personas fallecidas en el año 2017 (Khan *et al.*, 2019).

En el caso de enfermedades neurodegenerativas, si bien no existen datos concretos, se tiene registro acerca de enfermedades como Alzheimer o Parkinson como las de mayor prevalencia (Montoya-Zanora & Rodríguez-Castañeda, 2023) en personas con más de 65 años. La EM es una enfermedad crónica neurodegenerativa no transmisible, autoinmunitaria, que afecta al Sistema Nervioso Central (SNC). En México, se estima una tasa promedio de EM de 18.7 por cada 100,000 habitantes, razón por la cual se le considera una enfermedad de baja prevalencia, lo que a su vez explica el bajo y deficiente sistema de diagnóstico a nivel nacional (Correa *et al.*, 2016; Velázquez *et al.*, 2003; Velázquez *et al.* 2023).

La EM tiene una menor prevalencia, 2.3 millones de casos a nivel mundial, y afecta a poblaciones de entre 20 a 40 años, grupos más jóvenes en comparación con la DT2 (Zhang *et al.*, 2023). Se caracteriza por un estado proinflamatorio y la desmielinización crónica, asimismo, esta patología a menudo conduce a una discapacidad clínica irreversible (Filippi *et al.*, 2018) y a diferencia de la DT2, no se conocen con precisión los factores que desencadenan tal estado proinflamatorio. Si bien el curso de la enfermedad es variable e impredecible, en algunas personas puede ser lenta y en otras se presenta de manera progresiva desde el inicio (Confavreux *et al.*, 2003, Amato & Ponciani, 2000). La EM, independientemente del curso de la enfermedad, provoca una gran cantidad de cambios físicos, cognitivos y conductuales que tienen un impacto importante en la calidad de vida, el bienestar psicológico y el funcionamiento cotidiano de los pacientes (Hanna & Strober, 2020).

Se ha observado, específicamente en DT2, la presencia de ansiedad y/o depresión con la progresión de la enfermedad (Darwish *et al.*, 2018). La prevalencia de estas afecciones en pacientes mexicanos se ha estimado en 48.27% y 55.10%, respectivamente (Tovilla-Zárate *et al.*, 2012). En EM, además de la discapacidad locomotora, en los últimos años se ha demostrado, cada vez con mayor evidencia, la aparición de síntomas psicológicos como depresión clínica y ansiedad, además del deterioro cognitivo (Hernández-Ledesma *et al.*, 2018). Estas

afecciones se han asociado, en los pacientes con EM, a la fisiopatología de la enfermedad y se han proporcionado nuevos e importantes conocimientos acerca de esta patología, tales como la disminución en el desempeño cognitivo durante progresión de la enfermedad; lo que exacerba otros síntomas como la fatiga y el dolor, que podría dificultar el apego al tratamiento de quienes sufren esta enfermedad (Rocca *et al.*, 2015, Feinstein, 2004, Benedict *et al.*, 2020). En personas que viven con EM se ha encontrado que la depresión (23.7%) y ansiedad (21.9%) son las complicaciones psicológicas más prevalentes (Hernández-Ledesma *et al.*, 2018).

Respecto a ambos padecimientos, existe un consenso acerca de la relación del incremento del hambre con la presencia de depresión y ansiedad, lo que provoca un consumo elevado de alimentos altos en grasas y azúcares procesados y disminuye la ingesta de frutas, verduras y fibra, lo cual conduce a una circulación elevada de citocinas proinflamatorias, así como un aumento en la magnitud de las comorbilidades propias de las enfermedades crónicas (Basiri *et al.*, 2023; Kris-Etherton *et al.*, 2021). Por lo anterior, resulta de gran relevancia evaluar los parámetros bioquímicos, la composición corporal de los participantes y observar si existe una relación con la sintomatología de ansiedad y/o depresión que presenten.

Impacto de las ECNT en la salud mental

Además de todas las complicaciones que conlleva el vivir con alguna de estas enfermedades, lo que concierne a la salud mental supone una gran preocupación debido a que la sintomatología aumenta de forma significativa la multimorbilidad y el deterioro progresivo en la salud (Bobo *et al.*, 2022). En las ECNT la afección más común asociada, en la población mexicana, con la salud mental es la depresión, como se menciona en Sarti *et al.* (2015), donde se establece una clara relación entre la aparición de síntomas depresivos con la progresión del deterioro generado por enfermedades crónicas como diabetes, cáncer y problemas cardíacos. Por lo tanto, se ha sugerido, con base en la gravedad de las secuelas generadas por estos trastornos mentales, un aumento en la multimorbilidad y muerte observadas en las ENCT (Bobo *et al.*, 2022).

De acuerdo con la Asociación Estadounidense de Psiquiatría, los trastornos de ansiedad podemos relacionarlos con un miedo excesivo hacia algún objeto o situación, lo que causa un temor y estado de alerta constante que repercute en la conducta de la persona y puede presentarse como una reacción adaptativa o como un síntoma o síndrome que acompaña diversos

padecimientos médicos y psiquiátricos (Asociación Americana de Psiquiatría, 2014; Sánchez-Sierra *et al.*, 2020). La depresión se puede definir como un problema mental que se asocia a una baja en el estado de ánimo de una persona y puede tener un impacto en su calidad de vida (World Health Organization (WHO), 2023). Afecta principalmente las relaciones interpersonales de quién la sufre y puede ser causada por factores como problemas en la vida de las personas, alguna situación traumática vivida en el pasado (Asociación Americana de Psiquiatría, 2014) o como en estos casos, la presencia de ECNT.

Fisiológicamente hablando, se ha encontrado que la depresión produce un desbalance en el eje hipotálamo-hipofisario-suprarrenal, causando principalmente una elevación en los niveles de cortisol, hormona que se ha documentado como un posible marcador tanto para la depresión como para la DT2 (Subba *et al.*, 2021; Darwish *et al.*, 2018). El desbalance de cortisol durante episodios de depresión tiene niveles de la misma magnitud durante períodos de ansiedad. La razón psicológica que se ha encontrado asociada a los desbalances hormonales se explica por el constante estímulo con estresores a los cuales el paciente está sometido. En esta población lo anterior puede deberse al diagnóstico de DT2 o EM y a las consecuencias que las enfermedades pueden generar en los hábitos personales (Basiri *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2020). El presente trabajo tiene como objetivo analizar los factores de riesgo asociados a parámetros bioquímicos, composición corporal y los síntomas de depresión y ansiedad en población mexicana con diabetes mellitus y esclerosis múltiple.

Materiales y métodos

Definición del universo

Se evaluaron a hombres y mujeres mayores de 18 años, con residencia en la ciudad de Santiago de Querétaro; 20 personas con diagnóstico de DT2 y 20 personas con EM que acudieron a todas las evaluaciones. Para DT2 se consideraron participantes con diagnóstico confirmado de la enfermedad, sin complicaciones y/o comorbilidades. En el caso de EM se incluyeron personas que tuvieran un diagnóstico previo realizado por neurólogo (de acuerdo con los Criterios de McDonald). Se excluyeron mujeres embarazadas y/o con reemplazo hormonal, así como personas que presentaran alcoholismo, abuso de drogas, trasplantes, que tuvieran alguna infección aguda o crónica, que estuvieran bajo tratamiento farmacológico por

infecciones al momento de la valoración sanguínea (antihistamínicos, antiinflamatorios), o con diagnóstico de alguna otra ECNT. Se excluyeron participantes que en la evaluación con M.I.N.I. PLUS (datos no mostrados) hayan obtenido 37 puntos o más para trastorno depresivo mayor y/o esquizofrenia, o con diagnóstico de trastorno neurocognitivo mayor. Fueron eliminados todos aquellos participantes que faltaron a alguna de las evaluaciones y quienes decidieron retirarse del estudio.

Recolección de datos

Se realizó la convocatoria de participación en el proyecto a personas residentes del estado de Querétaro, la difusión se realizó a través de medios escritos (carteles y folletos) y orales (pláticas informativas en la Facultad de Medicina de la UAQ (FM-UAQ)) y la Unidad de Medicina Familiar (UMF) No. 13 DiabetIMSS, así como con la Asociación SinMielina A.C. Los voluntarios se seleccionaron con base en los criterios previamente establecidos, se les informó sobre la naturaleza, riesgos, resultados y alcance del estudio y, en caso de estar interesados en participar, otorgaron su consentimiento informado firmado (aprobado por el Comité de Bioética de la FM-UAQ, No.01-02/06/2016).

Historia clínica

Posteriormente, los participantes fueron evaluados en la Clínica del Sistema Nervioso de la FM-UAQ, en donde se registró su historia clínica que contempló datos generales sobre el estado de salud de cada participante. Asimismo, se les realizó la evaluación del inventario de depresión y el de ansiedad de Beck (Asociación Americana de Psiquiatría, 2014; Jurado *et al.*, 1998; Sanz *et al.*, 2003).

Evaluación de ansiedad y depresión

Con el objetivo de valorar los síntomas somáticos de ansiedad se aplicó el Inventario de Ansiedad de Beck, un cuestionario autoaplicable que consta de 21 preguntas y proporciona un intervalo de puntuación entre 0 y 63. Los puntos de corte sugeridos por Robles *et al.* (2002) son: de 0 a 5 puntos, ansiedad mínima; de 6 a 15, ansiedad leve; de 16 a 30 puntos, ansiedad moderada, y de 31 a 63, ansiedad severa con un alfa de Cronbach de 0.83 en la población mexicana. El criterio para considerar la ansiedad como clínicamente relevante es obtener 16 puntos o más. Cada ítem se puntúa en una escala tipo Likert de 0 a 3, correspondiendo la puntuación 0 a “en absoluto”, 1 a “levemente”, 2 a “moderadamente” y 3 a “severamente”. Los síntomas hacen referencia a la última semana y al momento actual de la valoración (Robles *et al.*, 2001).

El Inventario de Depresión es un cuestionario autoaplicable transculturalmente, contempla seis de los nueve criterios diagnósticos del DSM-5 que se miden mediante 21 ítems, en una escala Likert de cuatro puntos, correspondiendo la puntuación 0 a “en absoluto”, 1 a “levemente”, 2 a “moderadamente” y 3 a “severamente” en cuanto a la sintomatología, cuya suma total fluctúa entre 0 y 63 puntos. Los puntos de corte sugeridos para su interpretación son: 0-13 síntomas mínimos, 14-19 síntomas leves, 20-28 síntomas moderados, 29-63 síntomas severos (Sanz *et al.*, 2003) con un alfa de Cronbach de 0.87 en población mexicana, el punto de corte establecido para la presencia de síntomas depresivos fue de 10 puntos con base en lo establecido por Jurado *et al.*, (1998).

Determinación de la composición corporal

Con la finalidad de conocer la proporción de grasa corporal se evaluó en los participantes con DT2 y EM la composición corporal con la TANITA (Body Composition Analyzer SC-331S) el cual utiliza una técnica de bioimpedancia. A los participantes con EM se les determinó la proporción de grasa mediante densitometría (DEXA). Todos los pacientes se presentaron en ayunas y sin haber tomado líquidos previamente a la valoración, portando ropa deportiva y sin objetos de metal. La estatura, en ambos grupos, se midió con el estadímetro (SECA).

Análisis bioquímicos

Con el suero de los participantes se realizaron las determinaciones de glucosa, urea, creatinina, ácido úrico, triglicéridos (TG), colesterol, LDL, HDL (A15 Biosystems) y la biometría hemática en el equipo Sysmex Kx-21N. En los participantes con DT2 se evaluó de forma adicional la HbA_{1c} e insulina para obtener el índice glucémico. En el caso de los participantes con EM se consideró el tipo de EM y el número de cuadros agudos, llamados brotes, que presentaron.

Análisis estadístico

Este es un estudio transversal comparativo, en el cual se compararon dos grupos de personas que viven con ECNT y se evaluó el impacto de los factores de riesgo propios de la enfermedad en su salud mental. Para el análisis descriptivo se calcularon medias y la desviación estándar (medidas de tendencia central y de dispersión), las variables tuvieron distribución no normal, por lo que se utilizaron pruebas no paramétricas, igualmente, se realizaron pruebas de Kruskal-Wallis y U de Mann Whitney. Para el análisis bivariado se utilizaron correlaciones de Spearman para variables cuantitativas con distribución no paramétrica (puntuación de depresión y ansiedad, valores bioquímicos y de

composición corporal) con un nivel de significancia de $p < 0.05$. Se utilizó Office Excel y el paquete estadístico GraphPad Prism Versión 6.

Resultados

Los grupos que se analizaron se integraron por 20 participantes cada uno, la edad promedio del grupo con DT2 fue de 52.4 años y en el grupo de EM fue de 40 años. En la Tabla 1 se muestran datos descriptivos de ambas poblaciones (DT2 y EM), en donde se observan su edad y sexo predominante de cada grupo. En este estudio se aprecia una mayor participación de mujeres que de hombres. Se observó que en las personas con EM se presenta una tasa de brotes anuales de al menos 1.1 brote/año. En lo que respecta al tipo de EM del grupo estudiado, el más frecuente es la EM remitente-recurrente con un 45%; seguido por la EM primaria progresiva con 10%, y la secundaria progresiva con 5% respectivamente.

Tabla 1

Datos descriptivos de los participantes con DT2 y EM.

Variable	DT2 (n=20)	EM (n=20)	Valor de p
Edad media (DE)	52.4 (5.7)	40 (10)	<0.0001
Sexo [n (%)]			
Mujeres	16 (80%)	12 (60%)	
Hombres	4 (20%)	8 (40%)	
Tasa de brotes/año	n.a.	1.1	
Diagnóstico de tipo de EM [n (%)]	n.a.		
RRMS		9 (45%)	
PPMS		2 (10%)	
SPSS		1 (5%)	
PRSS		0 (0%)	
No especificado		8 (40%)	
Inventario de Ansiedad de Beck (DE)	12.2 (9.8)	24.8 (14.2)	0.0068
Clasificación [n (%)]			
Ansiedad mínima	6 (30%)	3 (15%)	
Ansiedad leve	7 (35%)	2 (10%)	
Ansiedad moderada	6 (30%)	6 (30%)	
Ansiedad severa	1 (5%)	9 (45%)	
Inventario de Depresión de Beck (DE)	10.3 (8.2)	14.4 (8.6)	n.s.
Participantes con depresión [n (%)]			
Clasificación (%)			
Síntomas mínimos	15 (75%)	11 (55%)	
Síntomas medios	2 (10%)	4 (20%)	
Síntomas moderados	2 (10%)	5 (25%)	
Síntomas severos	1 (5%)	0 (0%)	

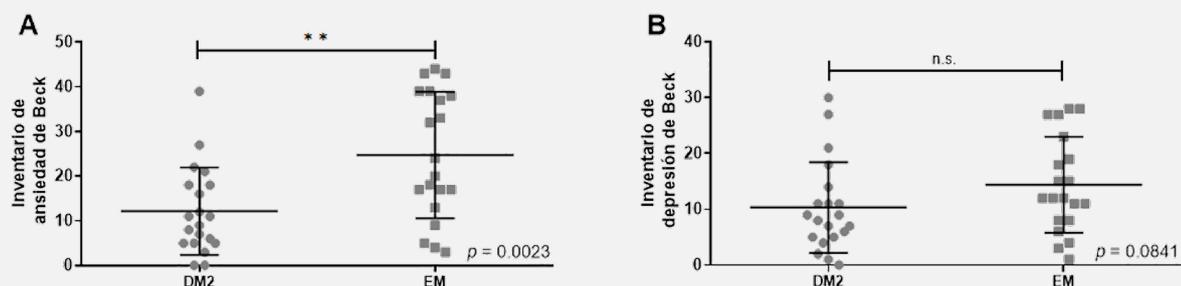
Abreviaciones: n.a.: no aplica; n.s.: no significativo; RRMS: esclerosis múltiple remitente recurrente; PPMS: esclerosis múltiple primaria progresiva; SPMS: esclerosis múltiple secundaria progresiva; PRMS: esclerosis múltiple primaria recurrente. Las diferencias estadísticas se determinaron con t de Student o U Mann-Whitney, dependiendo de la distribución de las variables.

El puntaje de síntomas de ansiedad es menor en DT2 con respecto al grupo de EM. En el grupo con DT2 la mayoría presentó síntomas mínimos de ansiedad en comparación con el grupo de EM. Ambos grupos presentaron 30% de síntomas moderados en ansiedad y el grupo con DT2 mostró menos síntomas de ansiedad severa con respecto al grupo con EM, donde observamos una diferencia significativa. Los datos generales de síntomas de depresión no mostraron diferencias importantes entre el grupo con DT2 y el grupo con EM.

En la Figura 1, se muestran los puntajes obtenidos de la aplicación del Inventario de Ansiedad y Depresión de Beck para ambas poblaciones. La Figura 1A, muestra que, en los síntomas de ansiedad, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las personas que viven con DT2 y las que viven con EM, siendo mayor en EM. En la Figura 1B se muestran los resultados de síntomas de depresión, se observó similitud en la sintomatología en las personas en ambos grupos.

Figura 1

Puntajes obtenidos en el Inventario de (A) Ansiedad (>16 puntos síntomas de relevancia clínica) y (B) Depresión de Beck (>10 síntomas de relevancia clínica). DT2: n= 20; EM: n=20; ** p= 0.0023; prueba t de Student no pareada (IC95%).



En la Tabla 2 se muestra el valor promedio de los parámetros de peso, estatura, índice de masa corporal (IMC) y porcentaje de grasa corporal de las personas con DT2 y EM. En lo que respecta a los intervalos establecidos por la OMS, valores de IMC > 25 Kg/m² se considera como sobrepeso, mientras que el IMC > 30 como obesidad (World Health Organization, 2023).

Tabla 2

Evaluación de los parámetros antropométricos y porcentaje de grasa de las personas con DT2 y EM.

Parámetro	DT2 (n=20)	EM (n=20)	Valor de p
Peso (Kg, DE)	74.3 (13.0)	71.9 (14.5)	n.a.
Estatura (m, DE)	1.59 (0.8)	1.63 (0.1)	n.a.
IMC	29.1 (4.4)	26.7 (4.4)	0.043
Porcentaje de grasa (% , DE)	37.4 (6.9)	38.3 (6.7)	n.a.

Abreviaciones: n.a.: no aplica; IMC: índice de masa corporal. Las diferencias estadísticas se determinaron con t de Student o U Mann-Whitney dependiendo de la distribución de las variables.

El IMC promedio de las personas con DT2 mostró que existe sobrepeso con una tendencia importante a la obesidad, como era de esperarse (Bragagnolo *et al.*, 2022; Klein *et al.*, 2022) y fue significativamente mayor en personas con DT2 que en personas con EM. En cuanto al porcentaje de grasa no hubo diferencias significativas en los participantes con ambas patologías.

En la Tabla 3 observamos los parámetros bioquímicos de las personas con DT2 y la EM, que tuvieron parámetros dentro de los valores de referencia en urea, creatinina, ácido úrico y en el cálculo nitrógeno ureico (BUN) en sangre, sin diferencias importantes. En el caso de la DT2, se presentó como era de esperarse, valores elevados de glucosa.

Tabla 3

Valores de las variables bioquímicas de los participantes con DT2 y EM.

Variable bioquímica (Valores de referencia)	DT2 (n=20)	EM (n=20)	Valor de p
Bioquímica sanguínea			
Glucosa (70-105 mg/dL)	123.1 (23.7)	94.7 (10.7)	<0.0001
Urea (20-40 mg/dL)	29.6 (7.9)	28.7 (9.6)	n.s.
BUN (0.5-1.4 mg/dL)	13.5 (3.2)	13.4 (4.5)	n.s.
Creatinina (2.5-7.7 mg/dL)	0.7 (0.2)	1.0 (0.2)	<0.0001

Ácido úrico (7-20 mg/dL)	5.2 (2.1)	6.7 (3.9)	n.s.
Colesterol total (<200 mg/dL)	187.8 (38.5)	194.9 (45.3)	n.s.
HDL (>40 mg/dL hombre y >50 mg/dL mujeres)	50.0 (13.4)	56.2 (13.1)	n.s.
LDL (<30 mg/dL)	101.9 (37.0)	130.1 (47.2)	n.s.
VLDL (>35 mg/dL)	36.9 (23.3)	14.7 (20.3)	<0.0001
TG (<159 mg/dL)	187.6 (114.5)	183.7 (133.3)	n.s.

Abreviaciones: n.s.: no significativo; BUN: nitrógeno ureico en sangre; HDL: lipoproteína de alta densidad; LDL: lipoproteína de baja densidad; VLDL: lipoproteína de muy baja densidad; TG: triglicéridos. Diferencias significativas determinadas con t de Student.

En los parámetros de colesterol (HDL, LDL, VLDL) y TG de los pacientes, en las personas con DT2 se tuvieron niveles superiores, en particular hubo una diferencia significativa en VLDL, con respecto al grupo con EM. Finalmente, de forma complementaria, también se evaluó la biometría hemática debido a que en las enfermedades crónicas el factor estresante es constante y puede alterar el sistema neuroendocrino y la respuesta inmunitaria, lo cual puede afectar el número de células circulantes del sistema inmunitario. Los resultados se muestran en la Tabla 4.

Es importante mencionar que todos los valores promedio de cada grupo se encuentran dentro de los intervalos considerados como normales. Sin embargo, en los valores de monocitos de las personas con EM se observó una tendencia a los valores superiores, dado que es una enfermedad autoinmunitaria que cursa con activación constante y exacerbada del sistema inmunitario.

Tabla 4

Valores obtenidos en la biometría hemática realizada a los pacientes con DT2 y EM.

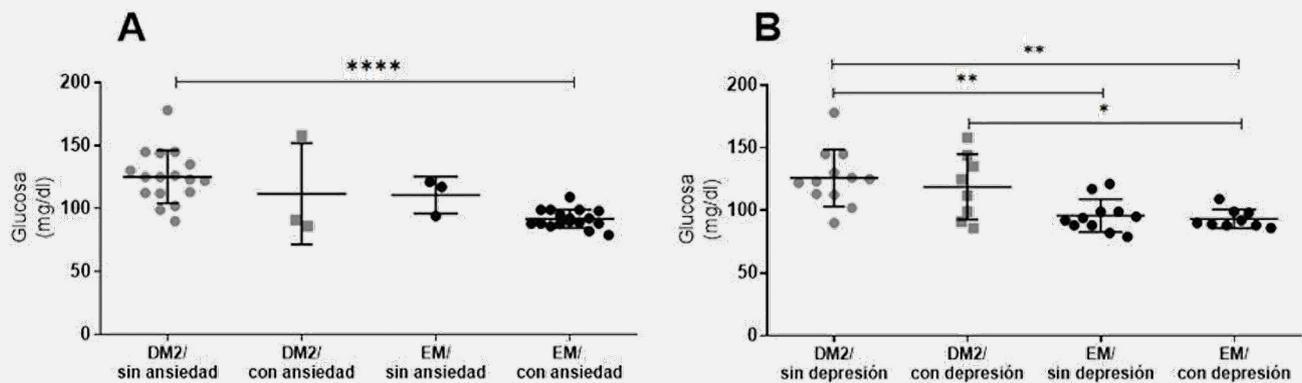
Parámetros (Valores de referencia)	DT2 (n=20; media, DE)	EM (n=20; media, DE)	Valor de p
Biometría hemática			
Eritrocitos (4.5-6 x 10 ⁶ /μL)	4.8 (0.4)	5.0 (0.6)	n.s.
Hemoglobina (Hombres: 14-18 g/dL) (Mujeres: 12-16 g/dL)	14.3 (1.7)	14.5 (1.9)	n.s.
Hematocrito (Hombres: 42-50%) (Mujeres: 40-48%)	42.8 (4.2)	43.4 (5.0)	n.s.
MCV (80-97 fL)	86.5 (12.8)	87.3 (4.8)	n.s.
Plaquetas (150-450 x10 ³ /μL)	256.9 (66.0)	244.9 (43.4)	n.s.
Leucocitos (4.5-10 x10 ³ /μL)	6.6 (1.5)	5.8 (1.1)	0.03
Linfocitos (20-40%)	32.7 (5.6)	34.3 (8.0)	n.s.
Monocitos (2-10%)	7.0 (1.6)	9.5 (1.9)	<0.0001
Neutrófilos (10-70%)	58.6 (6.9)	56.3 (7.8)	n.s.

Abreviaciones: n.s.: no significativo; MCV: volumen corpuscular medio. Diferencias significativas determinadas con t de Student no pareada.

En la Figura 2 se clasificaron los participantes con DT2 o con EM en dos grupos, los que tuvieron sintomatología de ansiedad y sin síntomas de ansiedad; y con y sin depresión. Se pudo observar que en ansiedad (Figura 2A) hay diferencias estadísticamente significativas entre los participantes con DT2 sin ansiedad y las personas con EM con síntomas de ansiedad y depresión. Los valores de glucosa en ayuno fueron menores en la población con EM.

Figura 2

Puntuación del Inventario de (A) ansiedad y (B) depresión de Beck y los valores de glucosa en los grupos (Tukey, **** $p < 0.0001$; ** $p < 0.005$; * $p < 0.05$).



Discusión

La ansiedad y depresión son padecimientos considerados las enfermedades de nuestro siglo, y su sintomatología aumenta en personas que viven con alguna enfermedad crónica (Bañegas-Cardero & Sierra-Calzado, 2017). Dependiendo de la ECNT de que se trate, sus posibles complicaciones o pronóstico, puede impactar en los síntomas de ansiedad y depresión. Sin embargo, existe poca información acerca de la comparación de los síntomas asociados a la salud mental en personas de nuestra región que viven con padecimientos que tienen alta prevalencia comparados con enfermedades menos comunes. Por este motivo en este estudio realizamos la comparación de los síntomas de ansiedad y depresión en dos patologías crónicas, DT2 de alta prevalencia y EM de menor prevalencia.

En este estudio, con base en los resultados obtenidos, podemos empezar discutiendo acerca de los síntomas que observamos en pacientes con DT2 (Tabla 2; Figura 1), que tuvieron presencia de ansiedad de interés clínico (± 16 puntos en BAI) en un 35% y sólo una persona manifestó ansiedad severa. Lo anterior concuerda con la estadística mencionada por la Asociación Americana de Diabetes. Así mismo, se ha aludido a que la prevalencia de ansiedad en personas con DT2 varía si la persona usa insulina (20%) o no (16%) como parte de su tratamiento, lo cual no se consideró en este estudio y puede abrir una oportunidad para futuras investigaciones.

Otro punto interesante para discutir sobre la importancia de estudiar más a fondo la relación entre la ansiedad y DT2 es el hecho de que muchas personas llegan a confundir la sintomatología de la ansiedad debido a la presencia de hipoglucemia

(Vieira, 2022). Lo anterior debido a que muchas veces no se tiene un control constante sobre sus niveles de glucosa, ya sea utilizando un monitoreo con dispositivos portátiles o más sencillos como la tira reactiva. Es muy importante que los pacientes con diabetes estén al tanto de sus niveles de glucosa con la finalidad de mantener una buena salud y calidad de vida.

En cuanto a la depresión, hubo presencia de síntomas mínimos a severos (25%) y el resto no tuvo síntomas (75%). Esto se debe a que, por lo regular, en los sistemas de salud, como el IMSS, en cuanto se diagnóstica a una persona con DT2 se le canaliza a su programa de apoyo DiabetIMSS, donde se les explica su estado de salud y se les orienta acerca de cuidados generales, estrategias de alimentación y revisiones periódicas. No obstante, el apoyo psicosocial y la evaluación de síntomas de ansiedad y depresión deberían formar parte del seguimiento continuo en enfermedades crónicas, no solo metabólicas, sino también neurológicas, con la finalidad de mejorar el afrontamiento de sus enfermedades, control glucémico y apego a sus tratamientos. Esto podría realizarse a través del trabajo conjunto de psicólogos, psiquiatras y los médicos familiares de los pacientes y especialistas como endocrinólogos (en el caso de DT2) o neurólogos (en el caso de EM) (Hernández-Ledesma *et al.*, 2018).

En algunas patologías, como el cáncer, se ha observado que 47.9% de los pacientes obtienen puntajes mayores a 14 en el inventario BDI, lo cual indica síntomas de depresión clínica (Alacacioglu *et al.*, 2013). En un trabajo de 2022 del grupo de Ayik y Büyükbayram (2022), se encontró que la media de puntuación de los participantes con distintos tipos de cáncer fue de 24 puntos con BAI, indicando también la presencia de síntomas clínicos de ansiedad.

En comparación con otro estudio similar en pacientes con DT2 (Tovilla-Zárate *et al.*, 2012), en el cual se recopilaron datos del estado de Tabasco para medir la prevalencia de estos trastornos, se encontró una prevalencia del 55.10% en ansiedad y de 48.27% en depresión. Al confrontarlo con los datos obtenidos en la muestra de nuestra investigación encontramos una diferencia de alrededor del 20% menos de sintomatología en ansiedad y depresión en DT2. En parte esto se debe al tamaño de muestra de los estudios, incluimos 20 personas en este estudio contra 709 del estudio de Tovilla-Zárate *et al.* Además de la diferencia en cuanto a las edades consideradas, ya que en el trabajo de Tovilla-Zárate *et al.* (2012) se valoraron a más de 400 personas cuya edad supera los 60 años. En este estudio

la población con DT2 contó con 52 años en promedio, y se ha demostrado que la edad es un factor crucial en la acumulación de síntomas depresivos y de ansiedad (Bobo *et al.*, 2022).

En este caso, sería importante realizar un estudio comparativo entre personas con DT2 controlada y no controlada, así como con personas con distintos tipos de EM, con la finalidad de observar si existen diferencias en las variables de síntomas de ansiedad, depresión y sus parámetros bioquímicos. Para lograr esto, es crucial aumentar el número de participantes de forma que se verifique si efectivamente se mantienen estos valores en salud mental. Es notorio que en las personas con EM existe una mayor incertidumbre en cuanto a la evolución de su patología, observamos que la mayoría de los participantes presentó síntomas considerables de ansiedad, y casi la mitad con ansiedad severa, lo cual podría ser indicativo tanto de la escasa información que existe de la enfermedad, como de la carencia respecto al apoyo social. Dado que la EM es de síntomas variables e impredecibles, se desconoce qué afectaciones tendrán al día siguiente y si lograrán o no recuperarse de cada episodio. Más aún, las personas con EM desconocen si después de cada brote tendrán una recuperación total, parcial o nula.

Se ha documentado previamente que existe una gran incertidumbre en el comportamiento de la EM, por tal motivo se le conoce como la “enfermedad de las mil caras” (Sippel *et al.*, 2021). Sin embargo, en nuestro estado hay poco apoyo psicosocial y solo existen algunos grupos, como asociaciones civiles, para este tipo de padecimientos. Lo anterior es un área de oportunidad para apoyar a que esta población pueda mejorar su calidad de vida y así obtengan el respaldo psicosocial que les ayude a afrontar la enfermedad. Así mismo, se puede informar lo que se podría esperar cuando se tiene este padecimiento, ya que en la experiencia que vivimos durante la realización de estas evaluaciones, los pacientes tardan de 7 a 10 años en que se les dé un diagnóstico certero, lo que genera gran incertidumbre y desesperación.

De igual manera, otro punto que es importante mencionar son las estrategias de afrontamiento que tanto las personas con EM como su familia desarrollan, que de acuerdo con Hernández-Ledesma *et al.* (2018), se realizan con base en la creación de un entorno familiar saludable, el apoyo y un enfoque positivo ante los problemas que surjan. Este campo también es una posibilidad de estudio, que puede ser abordado desde distintos ángulos como el tipo de EM, la edad, así como explorar las repercusiones con base en el tratamiento, los marcadores

relacionados con el estrés, como el cortisol; ya que reflejan la respuesta de nuestro sistema a un estímulo estresor crónico, como lo puede ser, en este caso, el vivir con una de estas enfermedades.

Al hacer una comparación con la población en general, de acuerdo con la última Encuesta Nacional de Bienestar Autorreportado (ENBIARE; Instituto Nacional de Geografía y Estadística: INEGI, 2021b) se encontró un 19.3% de ansiedad severa en la población en general, mientras otro 31.3% manifestó síntomas mínimos y 15.4% síntomas depresivos, aunque en mujeres llegó hasta 19.5%. Mientras que, en este estudio, aunque con una muestra pequeña, se observó 45% de ansiedad severa en las personas con EM, que es más del doble que en el resto de la población. Así mismo los datos fueron mayores en depresión, siendo más de 3 veces mayor en personas con EM (75%) que en la población en general (15%).

La composición corporal se evaluó con la finalidad de comprender si el tejido adiposo tendría alguna relación con la promoción de los síntomas de ansiedad y depresión. Sin embargo no hubo datos relevantes, quizá al aumentar el número de los participantes en la muestra se podrán observar relaciones significativas y evaluar otros parámetros, como factores de inflamación, que pudieran elucidar el papel de este tejido con la presencia de síntomas en enfermedades mentales. En las evaluaciones bioquímicas (Tabla 3) si hubo datos a destacar, principalmente los relacionados con el perfil de lípidos, ya que las personas con EM tuvieron niveles elevados en colesterol y LDL, lo cual no se ha documentado de forma amplia, pero que en nuestro grupo de investigación ya habíamos observado previamente (Hernández-Ledesma *et al.*, 2020). Un dato que podría contribuir a comprender estos resultados en los parámetros bioquímicos sería la evaluación del consumo de alimentos, suplementos y el metabolismo en estos pacientes. En las evaluaciones de biometría hemática (Tabla 4) no hubo datos fuera de los parámetros de referencia. En la Figura 2 no hubo diferencias que no fueran supuestas, se esperaba que los niveles de glucosa fueran más elevados en DT2, sin embargo, resultará interesante evaluar qué sucede con los valores del perfil de lípidos.

Conclusión

Se requiere una mejor identificación de los síntomas de ansiedad y depresión en la población queretana con ECNT, así como una mejor comprensión y canalización en los tratamientos farma-

cológicos y psicológicos (por ejemplo, una de ellas: las terapias cognitivo-conductuales), disponibles para los pacientes. En ambas poblaciones evaluadas se encontraron datos de ansiedad y depresión, en EM hay una necesidad importante de atender a las personas que viven con ansiedad y depresión severa, así como generar estrategias que permitan mejorar su salud mental. Se sugiere, además, un diagnóstico oportuno y eficaz para la detección de la EM a nivel nacional y otras enfermedades crónicas no transmisibles, ya que, aunque se considere de baja prevalencia, no deja de ser relevante y tener impacto en la salud de los mexicanos. De igual manera, creemos que es importante revisar y considerar otros factores de riesgo y los efectos que puedan tener en el progreso de su enfermedad, dado que pueden aumentar el avance y la presentación de sintomatología en ambas enfermedades. Se deben considerar los tratamientos que lleva cada tipo de patología con la finalidad de comprender su impacto en el desarrollo de estas.

En nuestro grupo de investigación tuvimos la oportunidad de establecer comunicación con los grupos de pacientes y canalizarlos con el apoyo psicológico que requerían, lo cual tuvo un impacto positivo que en este artículo no alcanzamos a abordar. Aún existen muchas áreas de oportunidad para mejorar la condición y evolución de estas poblaciones y se espera brindar más apoyo psicosocial a los grupos que padecen ECNT y detectar en cada una cuál es el área en la que más se requiere atención para mejorar su calidad de vida.

Agradecimientos

Agradecemos la participación de los grupos de DiabetIMMS, Sin Mielina A.C., sin su apoyo no sería posible este trabajo. Así mismo, agradecemos el financiamiento de FOPER y el “FONDO PARA EL FORTALECIMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN UAQ-2018” (FOFIUAQ FME-18-10).

Referencias

- Alacacioglu, A., Tarhan, O., Alacacioglu, I., Dirican, A., & Yilmaz, U. (2013). Depression and anxiety in cancer patients and their relatives. *J BUON*, 18(3), 767-774. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24065497>
- Amato, M. P., & Ponziani, G. (2000). A prospective study on the prognosis of multiple sclerosis. *Neurological Sciences*, 21(0), S831-S838. <https://doi.org/10.1007/s100720070021>
- Asociación Americana de Psiquiatría. (2014). *Manual diagnóstico y estadístico de los trastornos mentales (DSM-5®)* (5.^a ed.).

- Ayik, D. B., & Büyükbayram, Z. (2022). The Identification of the Relationship Between Oncology Patients' Care Dependency and Anxiety Levels. *Journal Of Basic And Clinical Health Sciences*, 6(2), 385-392. <https://doi.org/10.30621/jbachs.1004095>
- Banegas-Cardero, A., & Sierra-Calzado, L. (2017). Variables bioquímicas e inmunológicas en pacientes con estrés agudo o crónico. *MEDISAN*, 21(8), 1008-1017. <http://scielo.sld.cu/pdf/san/v21n8/sano8218.pdf>
- Basiri, R., Seidu, B., & Rudich, M. (2023). Exploring the Interrelationships between Diabetes, Nutrition, Anxiety, and Depression: Implications for Treatment and Prevention Strategies. *Nutrients*, 15(19). <https://doi.org/10.3390/nu15194226>
- Basto-Abreu, A., López-Olmedo, N., Rojas-Martínez, R., Aguilar-Salinas, C. A., Moreno-Banda, G. L., Carnalla, M., Rivera, J. Á., Romero-Martínez, M., Barquera, S., & Barrientos-Gutiérrez, T. (2023). Prevalencia de prediabetes y diabetes en México: Ensanut 2022. *Salud Publica de Mexico*, 65, s163-s168. <https://doi.org/10.21149/14832>
- Bazargan-Hejazi, S., Dehghan, K., Edwards, C., Mohammadi, N., Attar, S., Sahraian, M. A., & Eskandarieh, S. (2020). The health burden of non-communicable neurological disorders in the USA between 1990 and 2017. *Brain Communications*, 2(2). <https://doi.org/10.1093/braincomms/fcaa097>
- Benedict, R. H. B., Amato, M. P., DeLuca, J., & Geurts, J. J. G. (2020). Cognitive impairment in multiple sclerosis: clinical management, MRI, and therapeutic avenues. *Lancet Neurology*, 19(10), 860-871. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(20\)30277-5](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(20)30277-5)
- Bobo, W. V., Grossardt, B. R., Virani, S., St Sauver, J. L., Boyd, C. M., & Rocca, W. A. (2022). Association of Depression and Anxiety With the Accumulation of Chronic Conditions. *JAMA Network Open*, 5(5). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2022.9817>
- Bragagnolo, J., Frechtel, G., & Mazza, C. (2022). Diabetes y Obesidad. *Revista de la Sociedad Argentina de Diabetes*, 56(1), 1-4. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2346-94202022000100001&lng=es&tlng=e
- Brown, R. B. (2023). Multiple Sclerosis and Sodium Toxicity: Controversy and Future Directions for Low-Salt Interventions. *Sclerosis*, 1(1), 9-21. <https://doi.org/10.3390/sclerosis1010003>
- Cheng, Y. J., Kanaya, A. M., Araneta, M. R. G., Saydah, S. H., Kahn, H. S., Gregg, E. W., Fujimoto, W. Y., & Imperatore, G. (2019). Prevalence of Diabetes by Race and Ethnicity in the United States, 2011-2016. *JAMA*, 322(24), 2389-2398. <https://doi.org/10.1001/jama.2019.19365>

- Codarri, L., Fontana, A., & Becher, B. (2010). Cytokine networks in multiple sclerosis: lost in translation. *Current Opinion in Neurology*, 23(3), 205–211. <https://doi.org/10.1097/wco.0bo13e3283391feb>
- Confavreux, C., Vukusic, S., & Adeleine, P. (2003). Early clinical predictors and progression of irreversible disability in multiple sclerosis: an amnesic process. *Brain*, 126(4), 770–782. <https://doi.org/10.1093/brain/awg081>
- Correa, E. M., Paredes, V. R. O., & Martínez, B. M. (2016). Prevalence of multiple sclerosis in Latin America and its relationship with European migration. *Multiple Sclerosis Journal - Experimental, Translational and Clinical*, 2. <https://doi.org/10.1177/2055217316666407>
- Darwish, L., Beroncal, E., Sison, M. V., & Swardfager, W. (2018). Depression in people with type 2 diabetes: current perspectives. *Diabetes, Metabolic Syndrome And Obesity: Targets And Therapy*, 11, 333–343. <https://doi.org/10.2147/dms0.s106797>
- Feinstein, A. (2004). The neuropsychiatry of multiple sclerosis. *Canadian Journal of Psychiatry*, 49(3), 157–163. <https://doi.org/10.1177/070674370404900302>
- Filippi, M., Bar-Or, A., Piehl, F., Preziosa, P., Solari, A., Vukusic, S., & Rocca, M. A. (2018). Multiple sclerosis. *Nature Reviews Disease Primers*, 4(1). <https://doi.org/10.1038/s41572-018-0041-48>
- Hamasaki, H. (2016). Daily physical activity and type 2 diabetes: A review. *World Journal Of Diabetes*, 7(12), 243–251. <https://doi.org/10.4239/wjd.v7.i12.243>
- Hanna, M., & Strober, L. B. (2020). Anxiety and depression in Multiple Sclerosis (MS): Antecedents, consequences, and differential impact on well-being and quality of life. *Multiple Sclerosis and Related Disorders*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.msard.2020.102261>
- Hernández-Ledesma, A. L. (2017). *Niveles de vitamina D y su asociación con factores inflamatorios en personas con esclerosis múltiple* [Tesis de maestría]. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Hernández-Ledesma, A. L., Rodríguez-Méndez, A. J., Gallardo-Vidal, L. S., García-Gasca, T., Alatorre-Cruz, J. M., García-Solís, P., Reyes, J. L., & Solís-Sáinz, J. C. (2020). Lipid profile: causal relationship on cognitive performance in multiple sclerosis? *Molecular Biology Reports*, 47(12), 9667–9676. <https://doi.org/10.1007/s11033-020-06011-3>
- Hernández-Ledesma, A. L., Rodríguez-Méndez, A. J., Gallardo-Vidal, L. S., Trejo-Cruz, G., García-Solís, P., & Dávila-Esquivel, F. J. (2018). Coping strategies and quality of life in Mexican multiple sclerosis patients: Physical, psychological and social factors relationship. *Multiple Sclerosis and Related Disorders*, 25, 122–127. <https://doi.org/10.1016/j.msard.2018.06.001>

- Hernández-Ledesma, A. L., Rodríguez-Méndez, A. J., Gallardo-Vidal, L. S., Robles-Osorio, M. L., Villagrán-Herrera, M. E., Martínez-Peña, M. G., & García-Gasca, T. (2021). Vitamin D status, proinflammatory cytokines and bone mineral density in Mexican people with multiple sclerosis. *Multiple Sclerosis and Related Disorders*, 56. <https://doi.org/10.1016/j.msard.2021.103265>
- Hidalgo-Villavicencio, G. A., & Cañarte-Vélez, J. C. (2022). Dislipidemia asociado a diabetes mellitus en adultos con y sin sobrepeso de la ciudad de Jipijapa. *Polo del Conocimiento*, 7(3). <https://doi.org/10.23857/pc.v7i3.3779>
- Honer, W. G., Hurwitz, T., Li, D. K. B., Palmer, M., & Paty, D. W. (1987). Temporal lobe involvement in multiple sclerosis patients with psychiatric disorders. *Archives of Neurology*, 44(2), 187–190. <https://doi.org/10.1001/archneur.1987.00520140053017>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2021a). Estadísticas a propósito del día mundial de la diabetes (14 de noviembre) [Comunicado de prensa]. https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2021/EAP_Diabetes2021.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2021b). Presenta INEGI resultados de la Primera Encuesta Nacional de Bienestar Autorreportado (ENBIARE) 2021 [Comunicado de prensa]. https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2021/Est-Sociodemo/ENBIARE_2021.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2023). Encuesta Nacional sobre salud y envejecimiento en México (ENASEM) y evaluación cognitiva [Comunicado de prensa]. https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/ENASEM/ENASEM_21.pdf
- Jerez-Fernández, C. I., Medina-Pereira, Y. A., Ortiz-Chang, A. S., González-Olmedo, S. I., & Aguirre-Gaete, M. C. (2022). Fisiopatología y alteraciones clínicas de la diabetes mellitus tipo 2. *Nova*, 20(38), 65–103. <https://doi.org/10.22490/24629448.6184>
- Jurado, S., Villegas, M. E., Méndez, L., Rodríguez, F. E. G., Loperena, V., & Varela, R. (1998). La estandarización del inventario de depresión de Beck para los residentes de la ciudad de México. *Salud Mental*, 21(3), 26–31. http://revistasaludmental.com/index.php/salud_mental/article/download/706/705
- Khan, M. A. B., Hashim, M. J., King, J. K., Govender, R. D., Mustafa, H., & Kaabi, J. A. (2019). Epidemiology of Type 2 Diabetes – Global Burden of Disease and Forecasted Trends. *Journal of Epidemiology and Global Health*, 10(1), 107–111. <https://doi.org/10.2991/jegh.k.191028.001>

- Klein, S., Gastaldelli, A., Yki-Järvinen, H., & Scherer, P. E. (2022). Why does obesity cause diabetes? *Cell Metabolism*, 34(1), 11-20. <https://doi.org/10.1016/j.cmet.2021.12.012>
- Kris-Etherton, P. M., Petersen, K. S., Hibbeln, J. R., Hurley, D., Kolick, V., Peoples, S., Rodriguez, N., & Woodward-Lopez, G. (2020). Nutrition and behavioral health disorders: depression and anxiety. *Nutrition Reviews*, 79(3), 247-260. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuaa025>
- Laakso, M., & Fernandes-Silva, L. (2022). Genetics of Type 2 Diabetes: Past, Present, and Future. *Nutrients*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/nu14153201>
- Liu, X., Haagsma, J. A., Sijbrands, E., Buijks, H., Boogaard, L., Mackenbach, J. P., Erasmus, V., & Polinder, S. (2020). Anxiety and depression in diabetes care: longitudinal associations with health-related quality of life. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57647-x>
- Montoya Zanora, P., & Rodríguez Castañeda, F. (2022). Enfermedades neurodegenerativas en adultos mayores: retos en el diagnóstico y tratamiento. *IBN SINA*, 13(2), 1-9. <https://doi.org/10.48777/ibnsina.v13i2.1311>
- Ong, K. L., Stafford, L., McLaughlin, S., Boyko, E. J., Vollset, S. E., Smith, A. E., Dalton, B., Duprey, J., Cruz, J. A., Hagins, H., Lindstedt, P. A., Aali, A., Abate, Y. H., Abate, M. D., Abbasian, M., Abbasi-Kangevari, Z., Abbasi-Kangevari, M., ElHafeez, S. A., Abd-Rabu, R., . . . Vos, T. (2023). Global, regional, and national burden of diabetes from 1990 to 2021, with projections of prevalence to 2050: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021. *The Lancet*, 402, 203-234. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(23\)01301-6](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(23)01301-6)
- Piovani, D., Nikolopoulos, G. K., & Bonovas, S. (2022). Non-Communicable Diseases: The Invisible Epidemic. *Journal Of Clinical Medicine*, 11(19). <https://doi.org/10.3390/jcm11195939>
- Qian, Z., Li, Y., Guan, Z., Guo, P., Zheng, K., Du, Y., Yin, S., Chen, B., Wang, H., Jiang, J., Qiu, K., & Zhang, M. (2023). Global, regional, and national burden of multiple sclerosis from 1990 to 2019: Findings of global burden of disease study 2019. *Frontiers in Public Health*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1073278>
- Rivera-Villaseñor, N. A. (2018). *Deterioro cognitivo en pacientes con diabetes mellitus tipo 2 y su asociación con niveles de IL-1 β y adiponectina*. [Tesis de maestría]. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Robles, R., Varela, R., Jurado, S., & Páez, F. (2001). Versión mexicana del inventario de ansiedad de Beck: propiedades psicométricas. *Revista Mexicana de Psicología*, 18(2), 211-218. <https://biblat.unam.mx/es/revista/revista-mexicana-de-psicologia/articulo/>

version-mexicana-del-inventario-de-ansiedad-de-beck-propiedades-psicometricas

- Rocca, M. A., Amato, M. P., De Stefano, N., Enzinger, C., Geurts, J. J., Penner, I. K., Rovira A., Sumowski, J. F., Valsasina, P., & Filippi, M. (2015). Clinical and imaging assessment of cognitive dysfunction in multiple sclerosis. *The Lancet Neurology*, *14*(3), 302-317. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(14\)70250-9](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(14)70250-9)
- Sánchez-Sierra, L. E., Gómez-Medina, O., Hernández, M., Díaz-Arrazola, N., Mejía-Escobar, C. K., Pastrana, M. A., Molina, A. M., Aguilar-Robledo, R. E., Ramos-Ortega, A. E., & Mejía, F. M. (2020). Prevalencia y Caracterización de Trastornos de Ansiedad y Depresión en pacientes con Diabetes Mellitus tipo 2, Honduras. *Revista Hispanoamericana de Ciencias de la Salud*, *6*(2), 42-52. <https://doi.org/10.56239/rhcs.2020.62.426>
- Sanz, J., Perdigón, A. L., & Vázquez, C. (2003). Adaptación española del Inventario para la Depresión de Beck-II (BDI-II): 2. Propiedades psicométricas en población general. *Clínica y Salud*, *14*(3), 249-280. <https://journals.copmadrid.org/clysa/archivos/86402.pdf>
- Sarti-Gutiérrez, E. J., Medina-Mora, M. E., & Real-Quintanar, T. (2015). *La depresión y otros trastornos psiquiátricos*. Intersistemas. https://www.anmm.org.mx/publicaciones/CANivANM150/L27_ANM_DEPRESION.pdf
- Shnek, Z. M., Foley, F. W., LaRocca, N. G., Smith, C. R., & Halper, J. (1995). Psychological predictors of depression in multiple sclerosis. *Journal of Neurologic Rehabilitation*, *9*(1), 15-23. <https://doi.org/10.1177/154596839500900103>
- Sedighi, S., Gholizadeh, O., Yasamineh, S., Akbarzadeh, S., Amini, P., Favakehi, P., Afkhami, H., Firouzi-Amandi, A., Pahlevan, D., Eslami, M., Yousefi, B., Poortahmasebi, V., & Dadashpour, M. (2022). Comprehensive Investigations Relationship Between Viral Infections and Multiple Sclerosis Pathogenesis. *Current Microbiology*, *80*(1). <https://doi.org/10.1007/s00284-022-03112-z>
- Sippel, A., Riemann-Lorenz, K., Scheiderbauer, J., Kleiter, I., Morrison, R., Kofahl, C., & Heesen, C. (2021). Patients experiences with multiple sclerosis disease-modifying therapies in daily life – a qualitative interview study. *BMC Health Services Research*, *21*(1). <https://doi.org/10.1186/s12913-021-07012-z>
- Subba, R., Sandhir, R., Singh, S. P., Mallick, B. N., & Mondal, A. C. (2021). Pathophysiology linking depression and type 2 diabetes: Psychotherapy, physical exercise, and fecal microbiome transplantation as damage control. *European Journal of Neuroscience*, *53*(8), 2870-2900. <https://doi.org/10.1111/ejn.15136>
- Sun, H., Saeedi, P., Karuranga, S., Pinkepank, M., Ogurtsova, K., Duncan, B. B., Stein, C., Basit, A., Chan, J. C., Mbanya, J. C., Pavkov, M. E.,

- Ramachandaran, A., Wild, S. H., James, S., Herman, W. H., Zhang, P., Bommer, C., Kuo, S., Boyko, E. J., & Magliano, D. J. (2022). IDF Diabetes Atlas: Global, regional and country-level diabetes prevalence estimates for 2021 and projections for 2045. *Diabetes Research and Clinical Practice*, 183. <https://doi.org/10.1016/j.diabres.2021.109119>
- Tovilla-Zárate, C. A., Juárez-Rojop, I., Peralta-Jimenez, Y., Jiménez, M. A., Vázquez, S. G., Bermúdez-Ocaña, D., Ramón-Frías, T., Genis-Mendoza, A. D., Pool-García, S., & López-Narváez, L. (2012). Prevalence of Anxiety and Depression among Outpatients with Type 2 Diabetes in the Mexican Population. *PLOS ONE*, 7(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0036887>
- Velázquez-Quintana, M., Macías-Islas, M. A., Rivera-Olmos, V., & Lozano-Zárate, J. (2003). Esclerosis Múltiple en México. Un estudio Multicéntrico. *Revista de Neurología*, 36(11), 1019-1022. <https://doi.org/10.33588/rn.3611.2002610>
- Velázquez, M., Rivas, V., Sanín, L. H., Trujillo, M., Castillo, R., Flores, J., & Blaisdell, C. (2023). Epidemiology of demyelinating diseases in Mexico: A registry-based study. *Multiple Sclerosis and Related Disorders*, 75. <https://doi.org/10.1016/j.msard.2023.104753>
- Vieira, G. (2022). *Ansiedad en personas con diabetes tipo 1 y tipo 2. Beyond Type 2.* <https://es.beyondtype2.org/investigacion-sobre-ansiedad-en-personas-con-diabetes-tipo-1-y-tipo-2/>
- World Health Organization (WHO). (2023). *Depresión.* <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/depression>

DIGITAL CIENCIA@UAQRO



SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN
INNOVACIÓN Y POSGRADO