



CienciAcierta®



CONTENIDO

Construcción de películas de Langmuir-Blodgett a partir de nanoestructuras

Cambios de uso de suelo y aglomeración urbana en Tlaxco, Tlaxcala

Síntesis y Aplicaciones Biomédicas de Compósitos en Estado Hidrogel
Empleando como Relleno Estructuras Organometálicas (MOFs)

Yacimientos y métodos extractivos para la recuperación de litio a partir de
espodumenas. Una revisión.

Alternativas para combatir las infecciones nosocomiales asociadas a catéteres
utilizando extractos naturales y tecnología del plasma.

Efecto del Tratamiento Térmico de Recocido Intercritico sobre la Microestructura
y su Resistencia a Corrosión y Desgaste de un Acero Grado Pj55

Dinámica de la industria hotelera en los pueblos mágicos de Coahuila

Modificación superficial de PET reciclado con plasma para el tratamiento de
fenoles en aguas residuales: revisión de conceptos.

Sistemas para la Liberación Sostenida de Doxorubicina basados en sílice
mesoporosa y quitosano: una revisión

“Habilidades y herramientas distintivas de los estudiantes de ingeniería con
mayor aceptación entre empleadores, de acuerdo con su modalidad educativa”



ISSN: 2683-1848

Publicada desde 2005

CienciAcierta, año 18, No. 70, abril-junio de 2022, es una publicación trimestral editada por la Universidad Autónoma de Coahuila, boulevard Venustiano Carranza s/n colonia República Oriente, C.P. 25380, Saltillo, Coahuila, Editor Responsable: Ing. Carlos Federico Robledo Flores. Reserva de Derechos al uso exclusivo **No. 04-2019-010914143600-203, ISSN: 2683-1848**, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número, Departamento de Divulgación Científica de la Dirección de Investigación y Posgrado UA de C, Ing. Carlos Federico Robledo Flores, Edificio "D" planta alta, unidad Camporredondo, Saltillo, Coahuila, C.P. 25280, fecha de última modificación, 10 de enero de 2022.

Consejo Ejecutivo Editorial:

Dra. Anna Iлина
Editor

annailina@uadec.edu.mx

Dr. David Castro Lugo

CISE-Universidad Autónoma de Coahuila
david.castro@uadec.edu.mx

Dr. José María Guajardo Espinoza
Editor asociado

Universidad Autónoma de Coahuila
jguajar@uadec.edu.mx

Ing. Carlos Federico Robledo Flores

Departamento editorial
Universidad Autónoma de Coahuila
carlos.robledo@uadec.edu.mx

Dr. José Sandoval Cortes

Subdirector Administrativo - DIP
Universidad Autónoma de Coahuila
josesandoval@uadec.edu.mx

Dr. Cristóbal Noé Aguilar González
Grupo de Bioprocesos

Universidad Autónoma de Coahuila
cristobal.aguilar@uadec.edu.mx

Dr. José Luis Martínez Hernández

Subdirector de Posgrado - DIP
Universidad Autónoma de Coahuila
Jose-martinez@uadec.edu.mx

Comité técnico editorial nacional e internacional

Dr. Jesús Alberto Montalvo Morales

Administración
Relaciones Internacionales-UAdeC
jesusmontalvo@uadec.edu.mx

Dra. Gabriela De La Peña Astorga

Comunicación
FCC-Universidad Autónoma de Coahuila
gabriela.pena@uadec.edu.mx

Dr. Gilberto Aboites Manrique

Sociología
CISE-Universidad Autónoma de Coahuila
gilberto.aboites@uadec.edu.mx

Dra. Irma Delia García Calvillo

Matemáticas
CIMA- Universidad Autónoma de Coahuila
irma.garcia@uadec.edu.mx

Dr. Pablo Ruiz Flores

Ciencias de la Salud
CIB- Universidad Autónoma de Coahuila
pabloruiz@uadec.edu.mx

Dr. José González Tovar.

Psicología
FP- Universidad Autónoma de Coahuila
josegonzaleztovar@uadec.edu.mx
josegtovar82@hotmail.com

Dra. Elda Patricia Segura Cenicerós.

Química
FCQ- Universidad Autónoma de Coahuila
psegura@uadec.edu.mx

Dr. Gustavo Félix Verduzco.

Economía
CISE- Universidad Autónoma de Coahuila.
gustavo.felix@uadec.edu.mx

Juan Carlos Centeno Maldonado

Jurisprudencia
FJ- Universidad Autónoma de Coahuila.
centenojuan@uadec.edu.mx

Dra. Virginia Nevárez Moorillón

Microbiología y ciencias ambientales
Facultad de Ciencias Químicas
Universidad Autónoma de Chihuahua, México
vnevare@uach.mx

Dra. Arely Prado Barragán

Biotecnología y Alimentos
Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa México.
lapb@xanum.uam.mx

Dr. Gerardo Gutiérrez Sánchez

Ciencias Químicas y Biológicas
CCRC-The University of Georgia, USA.
gerardo@ccrc.uga.edu

Dr. Guillermo Picó

Ciencias Bioquímicas y Farmacéuticas
Universidad Nacional de Rosario, Argentina
gpico@fbioyf.unr.edu.ar

Dr. Luis Huesca Reynoso

Economía
Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, México
lhuesca@ciad.mx

Dr. Manuel Gil Antón

Educación
El Colegio de México
mgil@colmex.mx

Dra. Laura Elena Zendejas Frutos

Educación
INEE
laura.zendejas@inee.edu.mx

Contenido

Construcción de películas de Langmuir-Blodgett a partir de nanoestructuras

Construction of Langmuir-Blodgett films from nanostructures

Martín Caldera-Villalobos, Violeta Álvarez-Venicio, María del Pilar Carreón-Castro..... 5

Cambios de uso de suelo y aglomeración urbana en Tlaxco, Tlaxcala

Land use changes and urban agglomeration in Tlaxco, Tlaxcala

Mayela Montserrat Gutiérrez-Carreón; Nancy Sierra-López; Ramos Montalvo-Vargas..... 43

Síntesis y Aplicaciones Biomédicas de Compósitos en Estado Hidrogel Empleando como Relleno Estructuras

Organometálicas (MOFs)

Synthesis and Biomedical Applications of Composites in Hydrogel State Using Metal-Organic Frameworks (MOFs) as a Filler

Tirso E. Flores-Guía, Nallely Escobedo-Estrada, Carlos A. González-Carbajal, Jesús A. Claudio-Rizo, Nayeli Rodríguez-Fuentes, Denis A.

Cabrera-Munguía 43

Yacimientos y métodos extractivos para la recuperación de litio a partir de espodumenas. Una revisión.

Deposits and extractive methods for the recovery of lithium from spodumens. A review

Diego Tamayo-Soriano Francisco Raúl Carrillo-Pedroza Antonia Martínez- Luévanos Ma. de Jesús Soria-Aguilar, Patricio Navarro-

Donoso 95

Alternativas para combatir las infecciones nosocomiales asociadas a catéteres utilizando extractos naturales y tecnología del plasma.

Alternatives to combat catheter-associated nosocomial infections using natural extracts and plasma technology.

Emilian Martínez Moreno, Rosa Idalia Narro Céspedes, Francisco Javier Alonso Montemayor, Nancy Verónica Pérez Aguilar, Yadira

Karina Reyes Acosta117

Efecto del Tratamiento Térmico de Recocido Intercritico sobre la Microestructura y su Resistencia a Corrosión y

Desgaste de un Acero Grado PJ55

Effect of the Intercritical Annealing Heat Treatment on the Microstructure and its Resistance to Corrosion and Wear of a PJ55 Grade Steel

Cynthia Abigail Guerra Linares, Ma.de Jesús Soria Aguilar, Josefina Garcia Guerra, Antonia Martinez Luevanos.....139

Dinámica de la industria hotelera en los pueblos mágicos de Coahuila

Dynamics of the hotel industry in Coahuila's pueblos mágicos

César Barboza-Lara, Leonor Gutiérrez-González y Horacio Salas-Torres156

Modificación superficial de PET reciclado con plasma para el tratamiento de fenoles en aguas residuales: revisión de conceptos.

Surface modification of recycled PET with plasma for the treatment phenols in wastewater: review of concepts

Reyna Rosaura Guadalupe Orsua Gaona, Rosa Idalia Narro Céspedes, Nancy Verónica Pérez Aguilar, Miriam Paulina Luévanos

Escareño, Luis Fernando Ricardo Mora Cortés181

Sistemas para la Liberación Sostenida de Doxorubicina basados en sílice mesoporosa y quitosano: una revisión

Systems for the Sustained Release of Doxorubicin based on mesoporous silica and chitosan: a review

Raúl Moreno Ruíz, Antonia Martínez Luévanos, Sofía Estrada Flores, María Cristina Ibarra Alonso.....212

Habilidades y herramientas distintivas de los estudiantes de ingeniería con mayor aceptación entre empleadores, de acuerdo con su modalidad educativa

Distinctive skills and tools of engineering students with greater acceptance among employers according to their educational modality

Nayali Argelia Polina-Mezquitic , Mónica Paulina López-Arteaga.....229

Construcción de películas de Langmuir-Blodgett a partir de nanoestructuras

Construction of Langmuir-Blodgett films from nanostructures

Martín Caldera-Villalobos^{1,2*}, Violeta Álvarez-Venicio²,
María del Pilar Carreón-Castro².

¹ Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Ing. J.
Cárdenas Valdez S/N, República, 25280 Saltillo, Coahuila, México.

² Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México, Cto.
Exterior S/N, C.U., Coyoacán, 04510, CDMX, México.

*Correo electrónico: mcalderafcq@uadec.edu.mx, caldera_martin@hotmail.com

ORCID (MCV): 0000-0002-6769-4532

(VAV): 0000-0001-8908-5124

(MDPCC): 0000-0002-8271-6250

RESUMEN

La técnica de Langmuir-Blodgett es uno de los mejores métodos para fabricar películas delgadas algunas de sus principales ventajas son: un alto grado de control en el arreglo ordenado de las moléculas, control del espesor, morfología, topografía y su buena reproducibilidad. Inicialmente la técnica fue utilizada para sustancias con un carácter marcadamente anfifílico. Recientemente, la técnica de Langmuir-Blodgett ha sido aplicada exitosamente para obtener películas delgadas de otros materiales que no se habían utilizado comúnmente con esta técnica. Por ejemplo, nanoestructuras a base de óxidos, calcogenuros, metales nobles y alótropos de carbono como el grafeno, fullereno y nanotubos y redes metal-orgánicas. En base a lo anterior, el objetivo de este trabajo es presentar a manera de revisión bibliográfica algunos avances recientes en la técnica de Langmuir-Blodgett para la obtención de nanopelículas a partir de otros materiales nanoestructurados. Además, se hace un análisis de cómo el ordenamiento obtenido mediante esta técnica repercute en las propiedades y aplicaciones de las nanopelículas. Por último, se discuten los retos y desafíos futuros para esta técnica.

Palabras Clave: Nanopelículas, nanoestructuras bidimensionales, películas delgadas

ABSTRACT

The Langmuir-Blodgett technique is one of the best methods to manufacture well-ordered thin films and some of its main advantages are: a great control in the arrangement of the molecules, the control of the thickness of the film, the morphology, and the topography, in addition, these have good reproducibility. At first the technique was used for substances with a markedly amphiphilic character. Recently, the Langmuir-Blodgett technique has been successfully applied to obtain thin films of other materials that had not been commonly used with this technique, for example: nanostructures based on oxides, chalcogenides, noble metals and carbon allotropes such as graphene, fullerene and nanotubes, and metal-organic

frameworks. From the above, the aim of this work is to present a bibliographic revision about recent advances in the Langmuir-Blodgett technique for the obtaining of nanofilms using another nanostructured materials as building blocks. Further, it is studied how the ordering obtained by this technique influences the properties and applications of thin films. Finally, future challenges for this technique are discussed.

Palabras Clave: Nanofilms, two-dimensional nanoestructures, thin films.

Introducción

Se define como película delgada a una capa de material sólido cuyo espesor es menor o igual a 100 nm y que se encuentra depositada sobre una superficie o sustrato (Gould, Kasap, & Ray, 2017) y debido a sus dimensiones se consideran materiales nanoestructurados. Actualmente, existe un creciente interés en las películas delgadas debido a sus aplicaciones en transistores flexibles, sensores, dispositivos de almacenamiento y dispositivos opto-electrónicos, entre otras (Ariga, 2020). Con el uso creciente de la nanotecnología, la técnica de Langmuir-Blodgett (LB) ha ganado relevancia ya que ofrece una forma simple para construir películas con espesor nanométrico, además, tiene el potencial para construir películas continuas y homogéneas sobre un área muy grande (Bodik y col., 2018). Al principio, la técnica fue desarrollada para el estudio de moléculas anfifílicas como los ácidos grasos y sus sales. Sin embargo, esta técnica se usa actualmente para fabricar películas delgadas de una amplia variedad de materiales que incluyen polímeros, macrociclos, dendrímeros, colorantes, cristales líquidos, compuestos organometálicos, entre otros. La mayoría de los materiales antes mencionados son orgánicos. Sin embargo, la técnica de Langmuir-Blodgett también puede aplicarse con materiales de una naturaleza muy distinta. Existe una gran variedad de nanomateriales cero-dimensionales (0D), unidimensionales (1D) y bidimensionales (2D) que pueden ser utilizados como bloques de construcción de películas de Langmuir-Blodgett.

¿Qué son las películas de Langmuir-Blodgett?

Una película de Langmuir-Blodgett es una película formada por una monocapa de moléculas que se encuentra depositada sobre un sustrato. Este tipo de película se obtiene a partir de moléculas con carácter anfifílico, es decir que tienen una cabeza hidrofílica y una cola hidrofóbica. Cuando las moléculas anfifílicas son colocadas en una interfase agua-aire estas tienden a orientar su cabeza hidrofílica hacia la subfase agua, mientras que la parte hidrofóbica se orienta hacia la subfase aire. Al principio, las moléculas anfifílicas tienden a ocupar toda el área disponible en la superficie de la subfase agua (Figura 1a). Sin embargo, el área ocupada por las moléculas puede disminuirse mediante dos barreras que se aproximan entre sí de forma simétrica (Figura 1b, 1c). De esta forma, las moléculas anfifílicas se aproximan unas a otras formando una monocapa de moléculas densa y compacta (Figura 1d). Dicha monocapa de moléculas flotando en la subfase agua se conoce como monocapa de Langmuir y en ella las moléculas anfifílicas se encuentran alineadas verticalmente con respecto a la subfase agua.

La evolución de la monocapa de Langmuir en la interfase agua-aire puede ser monitoreada mediante el método de la placa de Wilhelmy, en cual se mide la fuerza vertical hacia abajo ejercida por la interfase sobre una placa. Esta técnica permite observar las diferentes fases por las que pasa la monocapa cuando se disminuye el área disponible. Dichas fases se pueden registrar en una isoterma de presión de superficie en función del área (Π -A) como se muestra en la Figura 1a. Cuando el área superficial disponible es muy grande las moléculas se encuentran dispersas y no interactúan entre sí. En estas condiciones no hay fuerza ejercida sobre la placa de Wilhelmy y esta etapa se denomina fase gas, la cual se observa en la isoterma como una línea horizontal. Al disminuir el área superficial por acción de las barreras móviles las moléculas se aproximan unas a otras llegando a estar muy próximas entre sí, pero conservan cierto grado de libertad y no tienen un patrón de ordenamiento a corto y largo alcance. A esta etapa de se le denomina fase líquida

y en la isoterma se registra como un ligero aumento en la pendiente. Al disminuir aún más el área disponible, las moléculas se empaquetan en una monocapa compacta con un alto grado de ordenamiento, formando la fase conocida como sólido. Dicha fase se identifica por un incremento drástico en la pendiente de la isoterma. Por último, al disminuir aún más el área disponible, las moléculas de la monocapa comienzan a apilarse unas sobre otras formando aglomerados debido a la sobre-compresión, a esta fase se le conoce como colapso de la monocapa. Para evaluar la tensión superficial se utiliza la placa de Wilhelmy la cual permite monitorear en tiempo real la evolución de la monocapa antes de realizar la transferencia a un sustrato sólido. Adicionalmente, la evolución de la monocapa en la interfase agua aire puede ser monitoreada mediante Microscopía de Ángulo de Brewster (BAM).

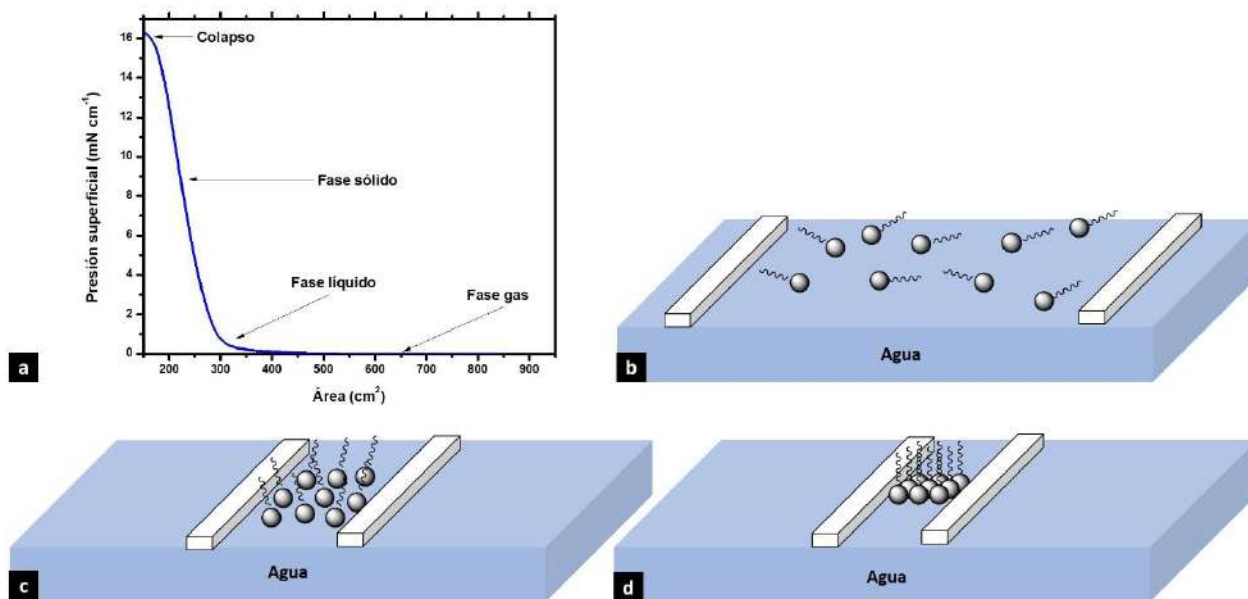


Figura 1. Evolución de una monocapa en la interfase agua-aire conforme disminuye el área superficial disponible: a) Isotherma Π -A de una monocapa de Langmuir y b) fase gas, c) fase líquido y d) fase sólido.

Fuente: Elaboración propia.

La fase sólida es la más adecuada para realizar la transferencia de la monocapa a un sustrato ya que es la que posee mayor grado de ordenamiento. Cuando se transfiere o deposita la monocapa en un sustrato sólido se le da el nombre de película Langmuir-Blodgett (LB). Para formar estas películas el sustrato entra o sale de forma vertical en la cuba donde se tiene la monocapa y las moléculas se adhieren al sustrato formando la película LB. Durante esta etapa es importante mantener la presión de superficie constante, por lo que el área de superficie debe disminuir conforme se transfiere la monocapa al sustrato sólido.

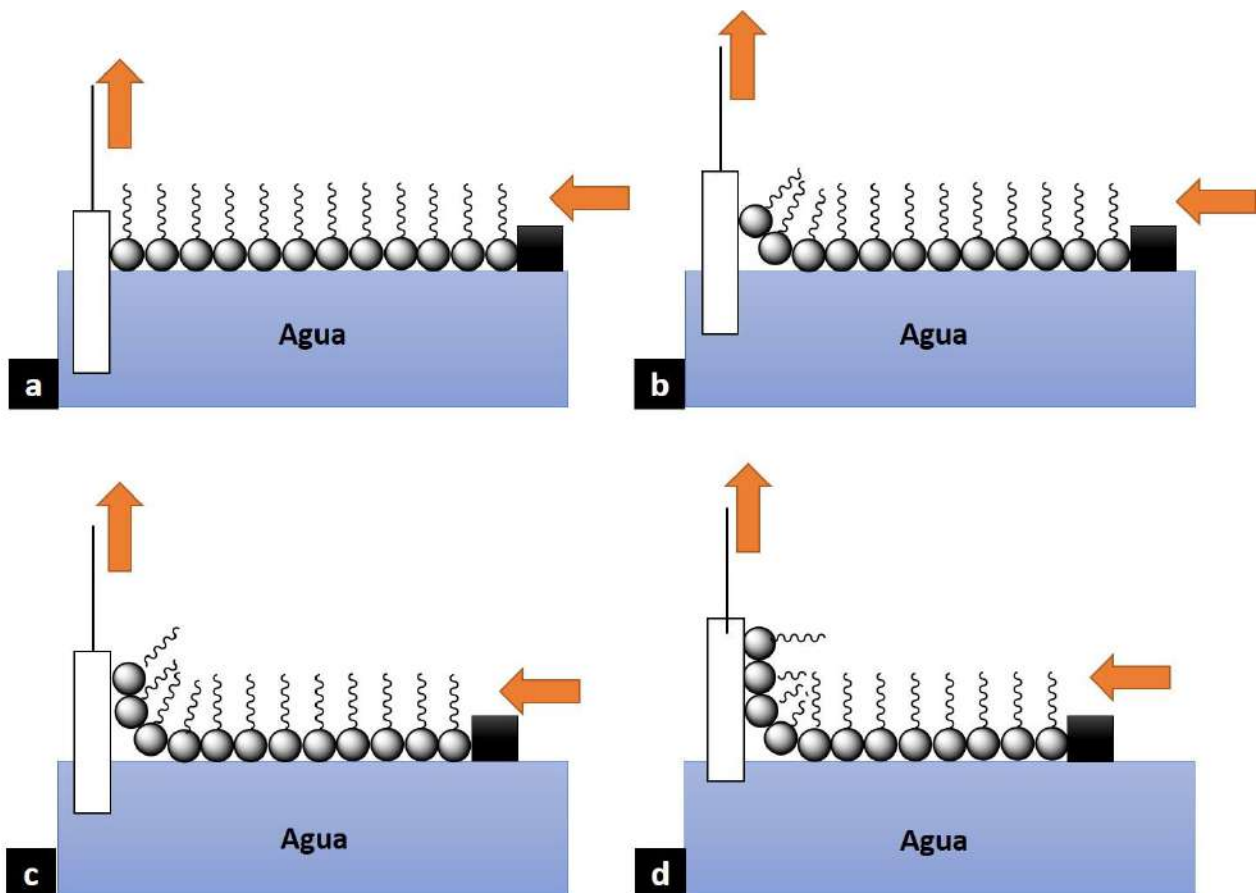


Figura 2. Depósito de una monocapa mediante la técnica de Langmuir-Blodgett: a) Monocapa fase sólido y sustrato vertical, b), c) y d) transferencia de la monocapa al sustrato.

Fuente: Elaboración propia.

Actualmente se ha encontrado que varios nanomateriales se comportan de forma similar a un anfífilo y forman monocapas de Langmuir estables en la interfase agua-aire. Por ejemplo, las partículas de óxidos como Fe_3O_4 , SiO_2 y TiO_2 poseen grupos $-\text{OH}$ en la superficie que son capaces de interactuar con la subfase agua (Sandu, 2003). El óxido de grafeno tiene en su estructura grupos hidrofílicos $-\text{OH}$ y $-\text{COOH}$ mientras que los anillos de carbono fusionados tienen carácter hidrofóbico, por lo anterior el óxido de grafeno se comporta como un anfífilo y forma monocapas de Langmuir (Paulista Neto & Fileti, 2018). De manera similar a las moléculas anfifílicas, las nanoestructuras flotan y se orientan de forma específica en la superficie de la subfase agua cuando son dispersadas en la interfase agua-aire (Figura 3a). Al aproximar las barreras de la cuba una respecto a la otra, el área disponible disminuye y las nanoestructuras comienzan a empaquetarse en una monocapa de forma similar a como lo hacen las moléculas anfifílicas (Figura 3b, 3c). Finalmente, las nanoestructuras se empaquetan en una monocapa densa, compacta y ordenada (Figura 3d) cuya densidad de empaquetamiento dependerá de la presión superficial aplicada para formar la película. Es importante recordar, que para obtener películas con espesor nanométrico los materiales empleados como bloques de construcción también deben poseer dimensiones nanométricas. Al depositar varias monocapas de Langmuir sobre un mismo sustrato (película LB) el espesor de la película incrementa hasta alcanzar varias decenas de nanómetros.

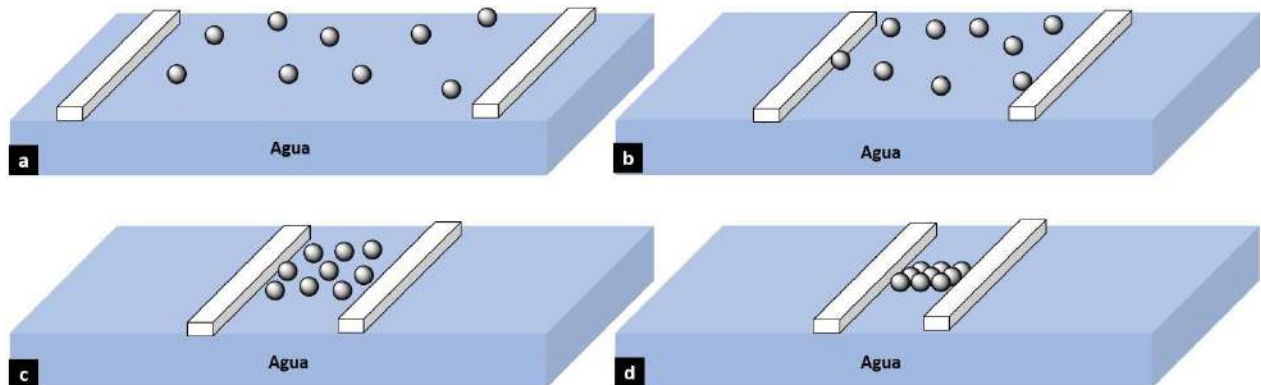


Figura 3. Representación de la formación de una película de Langmuir a partir de nanoestructuras cero-dimensionales.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4 muestra una cuba de Langmuir que es el instrumento utilizado para fabricar las películas de Langmuir-Blodgett. En ella podemos observar una cuba de agua con dos barreras rectangulares móviles, una microbalanza con un plato de Wilhelmy para medir la presión de superficie y una pinza móvil para sujetar los sustratos en los cuales se depositará la monocapa. A pesar de que la fabricación de películas de Langmuir-Blodgett se realiza comúnmente utilizando instrumentación especializada, existen métodos alternativos que ponen esta técnica al alcance de cualquiera. Por ejemplo, la compresión de las monocapas en ausencia de barreras puede realizarse mediante la fuerza capilar inducida por un material poroso como una esponja, la cual es usada como un sifón en un extremo de la superficie de la subfase agua mientras la compresión de la monocapa ocurre en el extremo opuesto. De esta forma se puede prescindir de la cuba con barreras simétricas que se utiliza habitualmente en esta técnica. Este método ha sido aplicado exitosamente para la formación de monocapas de Langmuir de nanotubos de carbono y óxido de grafeno. Estas monocapas pueden ser transferidas sin ninguna fractura hacia un sustrato sólido manteniendo un alto grado de compactación y el método puede ser utilizado para depositar múltiples capas sobre el mismo sustrato (Xiao y col., 2016).

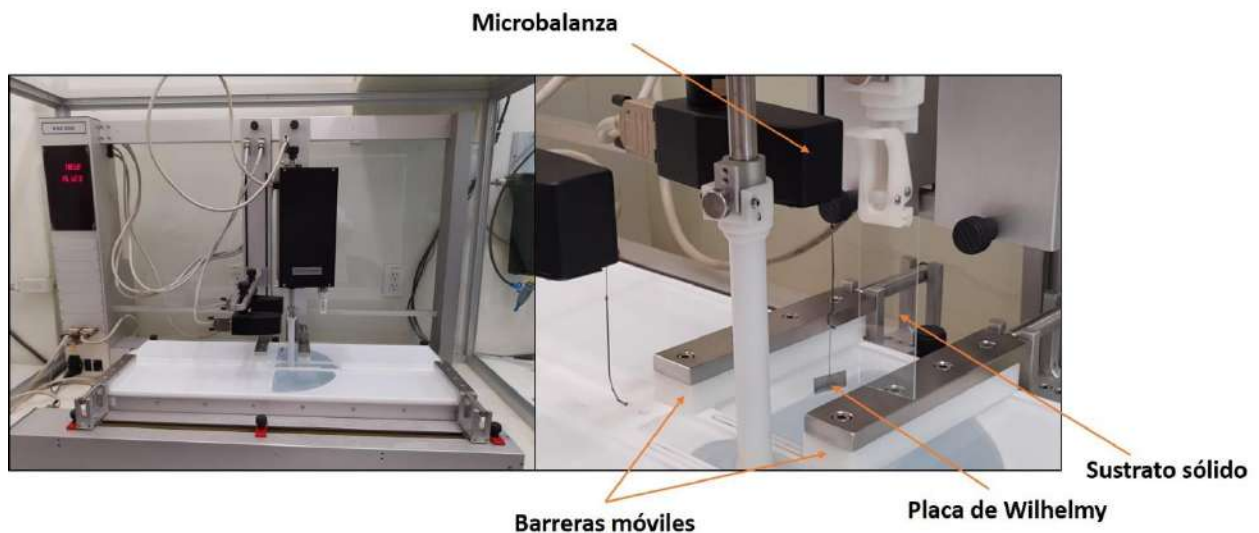


Figura 4. Cuba de Langmuir y algunos de sus componentes.

Fuente: Elaboración propia.

La técnica de Langmuir-Blodgett tiene muchas ventajas sobre otras técnicas empleadas para la fabricación de películas delgadas como deposición química de vapor, epitaxia, deposición de suspensión, recubrimiento por inmersión, recubrimiento por giro, recubrimiento por rocío y ensamblaje por filtración, entre ellas podemos mencionar la obtención de películas con un alto grado de orden, control sobre la densidad y espesor de la película, poco consumo de material y de energía, y alto grado de reproducibilidad (Xiao y col., 2016).

La técnica de Langmuir-Blodgett es adecuada para recubrir sustratos de áreas grades, para incrementar la productividad de esta técnica, Parchine y colaboradores combinaron las técnicas de Langmuir Blodgett y *roll to roll*, de esta forma, la película se forma en la interfase agua-aire y se deposita a través de un sistema de rodillos que transporta el sustrato de forma continua (Kohoutek y col., 2018). Con esta implementación lograron depositar de forma continua películas delgadas formadas por nanoesferas de óxido de silicio cubriendo un área de hasta 340 cm² (Parchine y col., 2016). Sin embargo, esta implementación está limitada al uso de materiales flexibles como sustratos.

Películas de LB a base de nanoestructuras de óxidos

Hasta la fecha, las nanoestructuras de óxidos metálicos más estudiadas para la construcción de películas de Langmuir-Blodgett son las nanopartículas y las nanoláminas obtenidas por exfoliación. Estas nanoestructuras son de tipo cero-dimensional y bidimensional respectivamente y son ideales para la construcción de películas delgadas cuyo espesor dependerá de las dimensiones de las nanoestructuras empleadas. Para preparar las monocapas de Langmuir se emplean soluciones coloidales que son dispersadas en la interfase agua-aire. Para aquellas nanoestructuras que son cero-dimensionales su patrón de ordenamiento es similar al de un conjunto de átomos en una red cristalina. De este modo las nanoestructuras cero-dimensionales en la monocapa se ordenan formando redes cuadradas, oblicuas o hexagonales (Figura 5).

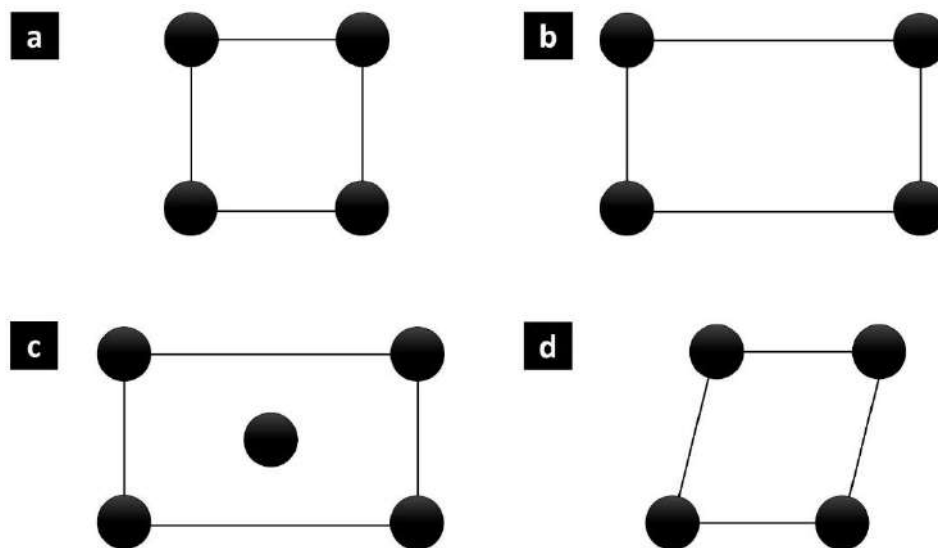


Figura 5. Redes de Bravais en un sistema bidimensional: a) cuadrada simple, b) cuadrada centrada, c) rectangular centrada y d) hexagonal.

Fuente: Elaboración propia.

Las nanopartículas esféricas de Fe_2O_3 forman súper-estructuras hexagonales cuando se ordenan en una película de Langmuir. De acuerdo con Ukleev y colaboradores el grado de ordenamiento obtenido depende del tamaño de las nanopartículas utilizadas. En experimentos realizados con nanopartículas monodispersas de 10 nm de óxido de hierro se obtuvieron monocapas con un alto grado de ordenamiento a largo alcance. Al utilizar nanopartículas de 20 nm se observó la formación de cúmulos tridimensionales con ordenamiento de corto alcance. Finalmente, empleando una mezcla de nanopartículas de 10 y 20 nm en una proporción de 3:1 se observó la formación de una monocapa ordenada formada por las nanopartículas de 10 nm con defectos formados por las nanopartículas de mayor tamaño (Ukleev y col., 2017). Dichos defectos son distorsiones en el patrón de ordenamiento de la película causadas por la presencia de una nanopartícula de mayor tamaño (Figura 6). Estos defectos son análogos a los defectos causados por un átomo sustitucional voluminoso en una solución sólida. De una forma similar, se han ensamblado nanodiscos de ZnO mediante la técnica de Langmuir-Blodgett formando una estructura que puede ser descrita como un cristal bidimensional (Meng y col., 2015).

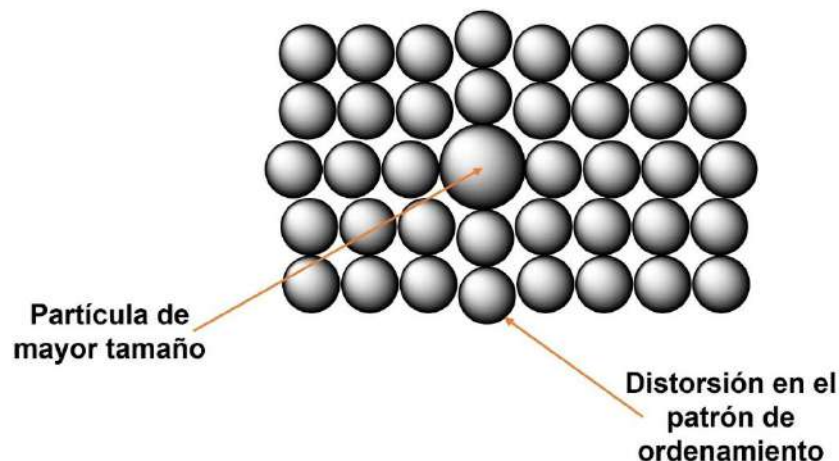


Figura 6. Representación de la formación de un defecto en una película de LB debido a la inserción de una nanopartícula de gran tamaño.

Fuente: Elaboración propia.

Debido a su alto grado de ordenamiento y a su actividad catalítica, las películas obtenidas a partir de nanopartículas de algunos óxidos metálicos son una plataforma ideal para el crecimiento de otros nanomateriales formando materiales compuestos con estructuras muy particulares. Por ejemplo, las películas de LB de nanopartículas de Fe_3O_4 y CoFe_2O_4 se han empleado para la síntesis de nanotubos de carbono alineados verticalmente (Figura 7). La nucleación y crecimiento de los nanotubos de ocurre en la superficie de las nanopartículas de óxido y debido al impedimento estérico crecen alineados verticalmente de forma espontánea. El diámetro de los nanotubos de carbono depende del tamaño de las nanopartículas y de la separación que existe entre ellas (Tamiya y col., 2018) (Sato y col., 2016) (Takagiwa y col., 2016)(Nakamura y col., 2016)

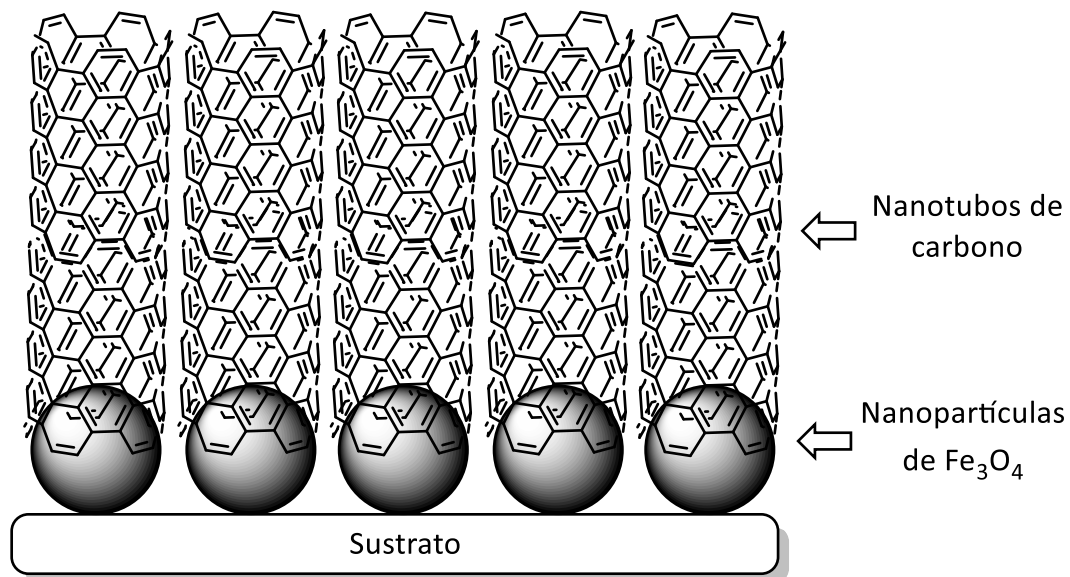


Figura 7. Representación de una película de nanotubos de carbono alineados verticalmente obtenida a partir de una película de Langmuir-Blodgett.

Fuente: Elaboración propia.

Algunos óxidos metálicos pueden ser exfoliados para obtener nanoláminas de espesor atómico de forma similar a como se produce el grafeno. Estas nanoláminas pueden auto ensamblarse en la interfase agua-aire para formar monocapas de Langmuir y posteriormente películas de Langmuir-Blodgett (Figura 8). Por ejemplo, el RuO_2 exfoliado forma monocapas estables en la interfase agua-aire que pueden ser depositadas sobre sustratos de policarbonato y pueden ser usadas para la fabricación de electrodos transparentes y flexibles (Yoo y col., 2017).

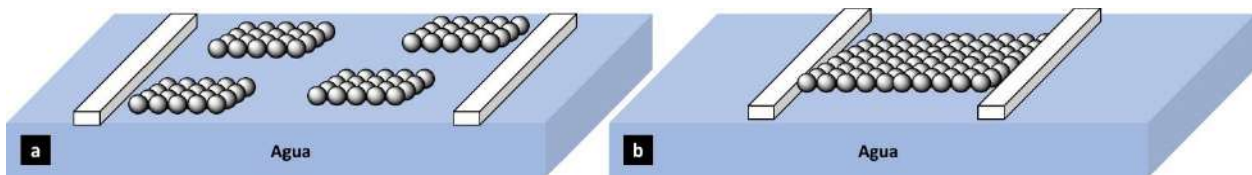


Figura 8. Representación de la formación de una película de Langmuir a partir de nanoestructuras bidimensionales.

Fuente: Elaboración propia.

A través de la técnica de Langmuir-Blodgett también se pueden obtener perovskitas artificiales con propiedades ferroeléctricas. El proceso consiste en crear una celda unitaria que se superpone a otra celda unitaria mediante la superposición alternada de láminas de óxidos distintos. Las nanoláminas de óxido se auto ensamblan en la interfase agua-aire por efecto de las fuerzas electrostáticas. Por ejemplo, la super red $(\text{Ti}_{0.87}\text{O}_2/\text{Ca}_2\text{Nb}_3\text{O}_{10})_2(\text{Ti}_{0.87}\text{O}_2)$ fue obtenida mediante el depósito alternado de monocapas de $\text{Ti}_{0.87}\text{O}_2$ y $\text{Ca}_2\text{Nb}_3\text{O}_{10}$. Este tipo de superredes son únicas estructuralmente y no pueden ser fabricadas en bulto por ningún otro método (Kim y col., 2015). Recientemente, también se ha reportado que la técnica de Langmuir-Blodgett también puede ser aplicada a polioxometalatos en forma de cúmulos estabilizados con surfactantes catiónicos (Liu & Wang, 2020).

Películas de LB a base de calcogenuros metálicos

Los calcogenuros metálicos son compuestos formados por al menos un ion calcogenuro como S^{2-} , Se^{2-} , Te^{2-} o Po^{2-} y un catión metálico. Algunos calcogenuros nanoestructurados son bien conocidos por sus propiedades ópticas ya que son fluoróforos inorgánicos. Además, las propiedades de estos materiales suelen mejorar cuando el material se encuentra nanoestructurado. Se ha reportado la formación de monocapas de Langmuir estables a partir de puntos cuánticos de CTeSe/ZnS con tamaño promedio de 5 nm (Bursa y col., 2018). También se ha reportado la obtención de películas de Langmuir-Blodgett depositando monocapas de puntos cuánticos de PbS en sustratos de cuarzo (Cao y col., 2017).

Lo anterior tiene una repercusión importante en las propiedades ópticas de las películas preparadas de este tipo de nanomateriales. Por ejemplo, al incrementar la densidad de empaquetamiento de puntos cuánticos de CdSe en una película de Langmuir-Blodgett su intensidad de fluorescencia disminuye drásticamente. Esto se atribuye a que los mecanismos de relajación no radiativos de los fluoróforos los cuales están más favorecidos en las películas con un empaquetamiento denso. El mismo efecto también se observa cuando los puntos cuánticos forman aglomerados, para evitar este efecto negativo se han empleado surfactantes adsorbidos en la superficie de los puntos cuánticos que actúan como espaciadores evitando la aglomeración (Alejo y col., 2017). Es decir, las moléculas de surfactante adsorbidas en la superficie de los puntos cuánticos actúan como barreras que impiden el contacto interpartícula. Otra aplicación interesante de las películas de Langmuir-Blodgett de puntos cuánticos es su uso como amplificadores de la resonancia del plasmón superficial de nanoestructuras de metales nobles. Se ha reportado que las películas de puntos cuánticos de CdSe depositadas mediante Langmuir-Blodgett sobre nanopelículas de Au favorecen la excitación de los plasmones superficiales mediante un efecto de proximidad (Sharma y col., 2016). Al igual que los óxidos mencionados anteriormente, algunos calcogenuros como el MoS_2 pueden ser exfoliados como el grafito para obtener nanoláminas de espesor

atómico. Las nanoláminas de MoS₂ pueden colocarse en la interfase agua-aire y constituyen bloques de construcción adecuados para la formación de películas de Langmuir-Blodgett (Zhang y col., 2017). Zheng y colaboradores prepararon películas LB de nanoláminas de MoS₂ obtenidas por exfoliación y depositadas en sustratos de cuarzo (Zheng y col., 2018).

Finalmente, la interfase agua-aire resulta un medio adecuado para la síntesis de algunos calcogenuros nanoestructurados mediante reacciones interfaciales, las nanopartículas de estos calcogenuros pueden ser generadas *in situ* en una sola etapa haciendo reaccionar sales de ácidos grasos disueltas en la subfase agua con H₂S gaseoso que fluye en la subfase aire. Este proceso produce nanopartículas de sulfuros metálicos con un tamaño entre 22 y 25 nm que forman monocapas de Langmuir y que posteriormente son transferidas a sustratos de cuarzo (Karthik y col., 2016). Una variante de esta técnica consiste en la combustión de los precursores en la interfase agua-aire la cual ha sido aplicada exitosamente para sintetizar puntos cuánticos de CdS. Esta metodología también puede utilizarse para la síntesis *in situ* de puntos cuánticos de WO₃ que posteriormente son transferidos a sustratos sólidos mediante la técnica de Langmuir-Blodgett (Jadhav y col., 2015).

Películas de LB a base de nanoestructuras de metales nobles

Las nanopartículas metálicas son bien conocidas por sus propiedades ópticas, antibacteriales, catalíticas y magnéticas. Las propiedades antes mencionadas han sido estudiadas principalmente en soluciones coloidales, donde las nanopartículas metálicas están estabilizadas por diferentes sustancias que evitan la aglomeración. Chung reportó que las nanopartículas de Ag se ensamblan espontáneamente en una superestructura bidimensional en la interfase agua-aire, este ensamble bidimensional surge de las interacciones interpartícula específicas que dependen del tamaño de las partículas y de los surfactantes que las recubren (Chung, 2017). De acuerdo con Lin y Lu las fuerzas adhesivas establecidas entre nanopartículas de Au ensambladas en las monocapas de Langmuir incrementan exponencialmente

al aumentar la densidad de empaquetamiento a través del aumento de la presión de superficie (Lin & Lu, 2017). Kuo y colaboradores encontraron que las nanopartículas forman diferentes superestructuras en función de su propia forma, por ejemplo, los nanocubos se ensamblan formando una red cuadrada mientras que los nanocubo-octaedros se ensamblan en una red hexagonal al igual que las nanopartículas esféricas. Las películas de Langmuir-Blodgett de nanocubos y nanocubo-octaedros tienen aplicación como portamuestras que mejoran la sensibilidad y relación señal ruido en la espectrometría de masas de ionización/desorción láser asistida por superficie (Kuo y col., 2017). Además, el ensamble de nanocubos de plata en películas de Langmuir-Blodgett causa cambios importantes en sus propiedades ópticas. El espectro de absorción UV-Vis de una solución coloidal de nanocubos de plata muestra una banda de absorción en 440 nm, mientras que el espectro de absorción de una película LB formada por los nanocubos de Ag muestra dos bandas de absorción entre 500 y 900 nm debido al acoplamiento de los plasmones de superficie de los nanocubos que forman la súper-red (Banchelli y col., 2015). Lo anterior da un ejemplo de cómo las propiedades de las nanoestructuras cambian al ensamblarse en una película de Langmuir-Blodgett. La formación de redes bidimensionales hexagonales en la interfase agua-aire también se ha observado con nanopartículas de Au, al cambiar las nanopartículas por nanorodillos se observa la formación de un arreglo paralelo. Sin embargo, la formación de estos arreglos paralelos no siempre es posible ya que también se ha reportado la formación de estructuras dendríticas a través de la compresión y descompresión de nanorodillos de oro en la interfase agua-aire. Respecto a la densidad, se ha observado que las nanopartículas tienden a formar películas más compactas y densas que los nanorodillos. Las propiedades ópticas de estas nanoestructuras también cambian una vez que se han ensamblado en una película de Langmuir-Blodgett, particularmente se ha reportado un desplazamiento batocrómico de la banda de resonancia del plasmón de superficie en el espectro de absorción de las películas. Este desplazamiento puede ser aprovechado para el

desarrollo de nuevos fotosensitizadores, quimiosensores y biosensores (Wu y col., 2017). Un aspecto interesante de las nanopartículas de Au en la interfase agua-aire es que pueden interactuar fuertemente con especies disueltas en la subfase agua formando monocapas mixtas que pueden ser transferidas a un sustrato sólido con ambos materiales simultáneamente, el resultado ~~neto~~ de este proceso es un co-depósito de las nanopartículas de Au y la sustancia disuelta en la subfase agua. Por ejemplo, esta interacción ha sido aprovechada para fabricar películas de Langmuir-Blodgett de nanopartículas de Au y porfirina de zinc (Camacho y col., 2015).

Además de las nanopartículas y nanorodillos, también se ha explorado la formación de películas de Langmuir-Blodgett a partir de otras nanoestructuras de metales nobles. Por ejemplo, Shi y colaboradores estudiaron la formación de películas de Langmuir a partir de nanoalambres de plata, ellos encontraron que la densidad y compactación de la película es mayor cuando los nanoalambres están recubiertos con una sustancia anfífila (Shi y col., 2017). También se han construido películas de Langmuir-Blodgett a partir de nano discos de plata las cuales han sido utilizadas como sustratos para el crecimiento de estructuras columnares útiles como polarizadores cromáticos (Mahmoud, 2016). Finalmente, se ha reportado que los cúmulos de oro de diferente tamaño como $Au_{25}R_{18}$, $Au_{38}R_{24}$, $Au_{144}SR_{60}$, and $Au_{333}SR_{79}$ ($R = C_{12}H_{25}$) también forman monocapas de Langmuir estables y uniformes que pueden ser transferidas a sustratos de silicio (Hirata y col., 2016). En otro estudio realizado con cúmulos se reportó que el tiempo de permanencia de la monocapa en la interfase agua aire antes de ser depositada en un sustrato tiene un efecto importante sobre la organización de los cúmulos en la película, evolucionando así a diferentes redes como la hexagonal compacta, cúbica simple, arreglos en forma de disco o una distribución completamente aleatoria (Swierczewski y col., 2021). Una de las aplicaciones de estas películas es la construcción de sensores de bilirrubina libre con límites de concentración a escala nanomolar (Xiao y col., 2021).

Los estudios realizados por Chen y colaboradores mostraron que la adición de un surfactante a la monocapa de nanopartículas de oro estabilizadas con tiolatos ayuda a incrementar la estabilidad de la monocapa y por consecuencia incrementa sus propiedades mecánicas. Sin embargo, es necesario seleccionar adecuadamente el surfactante empleado ya que se ha observado que los ácidos grasos comunes no aumentan la estabilidad de la monocapa, por el contrario, favorecen que las nanopartículas de Au sean expulsadas de la monocapa cuando se realiza la compresión evitando la formación de películas densas, compactas y libres de defectos (Chen y col., 2017).

Películas de LB a base de Fullerenos

La molécula de fullereno (C_{60}) tiene una forma esférica con un diámetro de 0.75 nm y al estar constituida únicamente por átomos de carbono posee un carácter altamente hidrofóbico. Por este motivo, se han sintetizado diferentes derivados de fullereno con grupos que le confieran carácter anfifílico y que sean adecuados para la fabricación de películas de Langmuir-Blodgett (Figura 9). La mayoría de estos derivados son insolubles en agua, pero pueden formar monocapas estables en la interfase agua-aire. Los fulerenos polihidroxilados (**1**) también llamados fulerenoles son unos de los derivados más simples del fullereno, son hidrosolubles y son capaces de formar películas de Langmuir-Blodgett (Noskov y col., 2019). Otra clase de derivados con largas cadenas alifáticas (**2**) han sido preparados mediante la funcionalización covalente de la molécula de fullereno para obtener compuestos formadores de películas de Langmuir-Blodgett (Neal & Nakanishi, 2021). En otra investigación se observó el autoensamblaje de un derivado anfifílico de fullereno (**3**) junto con ADN para formar nanoestructuras en forma de láminas (Ramesan y col., 2022). La formación de películas compuestas también se ha logrado mezclando los derivados catiónicos **4** y **5** con nanocristales de celulosa sulfatados, los cuales conducen el autoensamblaje y distribución homogénea de las moléculas de fullereno en la interfase agua-aire mejorando las propiedades fotoeléctricas de las películas

(Sawalha y col., 2020). Finalmente, las metodologías de reacciones *click* han sido aplicadas para unir covalentemente segmentos de polímeros hidrofílicos como el polietilenglicol (PEG) a moléculas de fullereno para obtener derivados anfifílicos (6) formadores de películas de Langmuir-Blodgett (Ou y col., 2019).

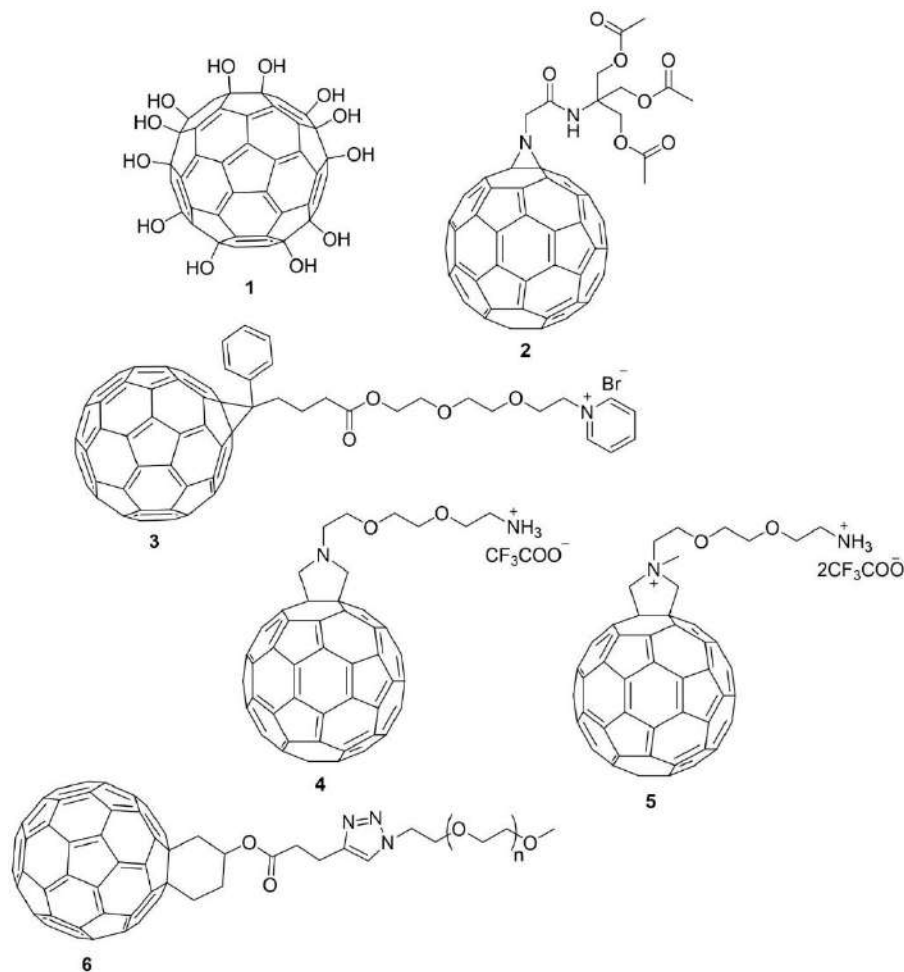


Figura 9. Derivados anfifílicos de fullereno utilizados para la construcción de películas de Langmuir-Blodgett.

Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, Amer y Altalebi demostraron que es posible obtener monocapas de Langmuir estables de fullereno a partir de soluciones preparadas en tolueno. De acuerdo con los autores, la concentración de fullereno en la interfase agua-aire es el parámetro clave para obtener monocapas estables sin formar aglomerados (Amer & Altalebi, 2018). De forma similar, es posible fabricar películas de Langmuir-Blodgett con puntos cuánticos de carbono de 5 nm, las películas formadas tienen un empaquetamiento compacto y un comportamiento mecánico rígido (Bodik y col., 2018).

Películas de LB a base de nanotubos de carbono

La interfase agua-aire es un medio ideal para ordenar nanotubos de carbono de forma paralela obteniendo películas delgadas con un alto grado de ordenamiento y con densidad elevada (Figura 10). Dicha alineación se logra realizando múltiples ciclos de compresión-expansión de una monocapa. La obtención de nanotubos de carbono alineados es de suma importancia porque ayuda a mejorar algunas propiedades eléctricas como la movilidad de cargas, la velocidad de conmutación y la transmisión de corriente (Gao y col., 2017). De acuerdo con Ramli y col., las soluciones de nanotubos de carbono empleadas para fabricar las películas deben tener una concentración sumamente baja para lograr la alineación paralela de los nanotubos en la interfase agua-aire. Por el contrario, el uso de soluciones con concentración elevada disminuye la calidad de las películas obtenidas (Ramli y col., 2016).

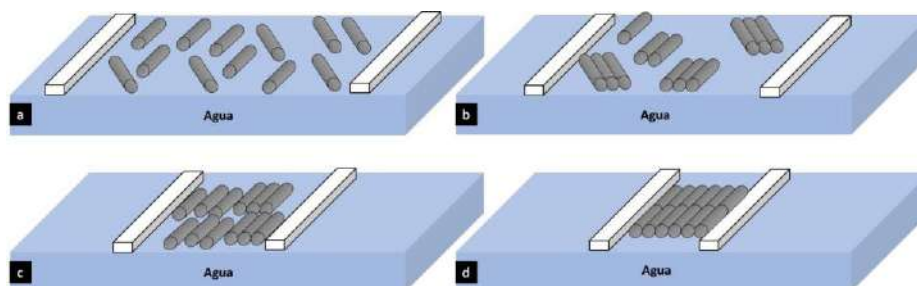


Figura 10. Representación de la formación de una película de Langmuir a partir de nanoestructuras unidimensionales.

Fuente: Elaboración propia.

Un estudio comparativo de películas delgadas de nanotubos de carbono de pared sencilla fabricadas mediante recubrimiento por inmersión, filtración y Langmuir-Blodgett mostró que esta última permite obtener un mejor control sobre la topografía de la superficie, homogeneidad y densidad de empaquetamiento. Además, las películas obtenidas por LB mostraron mayor transmitancia, menor rugosidad, mayor conductividad eléctrica y una variación mínima en las propiedades eléctricas (Yahya y col., 2017). Un aspecto interesante es que las propiedades eléctricas de las películas de nanotubos de carbono obtenidas mediante la técnica de Langmuir-Blodgett son anisotrópicas, es decir, las películas actúan como un conductor o dieléctrico dependiendo de la alineación de los nanotubos con respecto al plano de polarización (0 o 90° respectivamente) (Devanarayanan y col., 2016).

Las películas de Langmuir-Blodgett de nanotubos de carbono interactúan fuertemente con sustancias con actividad biológica. Recientemente, se ha reportado un aumento en la actividad catalítica de la enzima penicilinasasa cuando esta se encuentra en una película de Langmuir-Blodgett mixta con nanotubos de carbono y un fosfolípido (Scholl y col., 2017). También, se ha propuesto a las películas de Langmuir-Blodgett de nanotubos de carbono como un modelo que ayude a entender la interacción que existe entre los nanotubos y las biomembranas (Matyszewska y col., 2018). El entendimiento de estas interacciones podría repercutir el diseño de sistemas para la liberación controlada de fármacos a partir de películas de Langmuir-Blodgett mixtas.

Recientemente, las investigaciones realizadas sobre películas de Langmuir-Blodgett de nanotubos de carbono se enfocan principalmente en la formación de películas mixtas combinando nanotubos con materiales poliméricos, moléculas orgánicas, enzimas, etc. Algunos ejemplos de películas mixtas preparadas por la técnica de Langmuir-Blodgett incluyen: nanotubos de carbono/ácido esteárico/asparaginasa (Rodrigues Rola Possarle y col., 2020), nanotubos de carbono/alginato/bromuro de dioctadecildimetilamonio/ureasa (Rodrigues y col., 2018), nanotubos de carbono/polianilina (Abdulla & Pullithadathil, 2020), nanotubos

de carbono/nafión (Wu y col., 2019) y nanotubos de carbono/colorante (Chen y col., 2018). La combinación de materiales en estas películas mixtas permite incrementar la actividad de las enzimas incorporadas y mejora la sensibilidad de detección de ciertos analitos. Dichas mejoras se atribuyen al ordenamiento controlado de los componentes que sólo puede alcanzarse con la técnica de Langmuir-Blodgett.

Películas de LB a base de grafeno

Las películas delgadas de grafeno son prometedoras para la obtención de electrodos transparentes, a menudo estas exhiben una gran cantidad de defectos que disminuyen su conductividad eléctrica. Sin embargo, cuando se utiliza la técnica de Langmuir-Blodgett para formar la película, se disminuye la cantidad de defectos presentes en las películas mejorando las propiedades eléctricas, además, la conductividad eléctrica de estas películas puede ser incrementada mediante el tratamiento fotoquímico posterior con radiación ultravioleta y ozono (Tomasevic Ilic y col., 2018).

Las nanoláminas de grafeno son obtenidas con facilidad mediante exfoliación del grafito, convirtiéndose en bloques de construcción adecuados para fabricar películas de Langmuir-Blodgett. Este método permite obtener electrodos transparentes de alta calidad con potencial aplicación en electrónica flexible e impresa, así como en la tecnología de recubrimientos. Un aspecto importante es que las propiedades eléctricas de las películas de grafeno obtenidas mediante la técnica de Langmuir-Blodgett son mejores en comparación con aquellas obtenidas por filtración al vacío, el cual es el método más común para el depósito de grafeno en películas delgadas (Tomasevic-Ilic y col., 2016).

Las películas delgadas de grafeno obtenidas mediante la técnica de Langmuir-Blodgett en combinación un catalizador de platino ofrece una mejora sustancial al desempeño de celdas solares, este material provee una interfase conductora grande que mejora la eficiencia de la transferencia de carga incrementando su eficiencia. Además, al utilizar la técnica de Langmuir-Blodgett se permite disminuir

la cantidad de catalizador necesario para el funcionamiento de estos dispositivos (Ibrayev y col., 2018).

Finalmente, la técnica de Langmuir-Blodgett también ha sido utilizada para la fabricación de películas delgadas a partir de nanocintas de grafito (5-50 nm de espesor) depositadas sobre sustratos de polidimetilsiloxano hidrofílico con aplicación en sensores de pulso sanguíneo con alta sensibilidad (Alaferdov y col., 2017).

Películas de LB a base de óxido de grafeno

A diferencia del grafeno que es hidrofóbico, el óxido de grafeno tiene cierto carácter anfifílico debido a la presencia de grupos -COOH y -OH (hidrofílicos) y por lo tanto forma monocapas en la interfase agua-aire con mayor facilidad. Los materiales compuestos a base de óxido de grafeno tienen mucha utilidad en baterías de ion-litio, transistores, supercapacitores, dispositivos fotovoltaicos, sensores, etc. Sin embargo, estas aplicaciones requieren metodologías que permitan obtener películas delgadas, con un buen grado de ordenamiento y espesor uniforme. Las características de estas películas pueden ser modificadas en etapas posteriores al depósito mediante el tratamiento con plasma de argón, este tratamiento incrementa la cantidad de grupos hidrofílicos en la superficie de la película mejorando su mojabilidad, adhesividad y biocompatibilidad (Ibrahim y col., 2018).

Es fácil preparar complejos de óxido de grafeno y otras sustancias en la interfase agua-aire disolviendo una sustancia hidrosoluble en la subfase agua, en donde, las moléculas de un colorante catiónico y las láminas de óxido de grafeno interactúan electrostáticamente formando una monocapa mixta que puede ser transferida a un sustrato (Gür y col., 2015). Este enfoque ha sido aplicado para obtener monocapas mixtas de porfirina de zinc y óxido de grafeno (Ermakova y col., 2018). En otra investigación se encontró que las láminas de óxido de grafeno promueven el auto-ensamblaje de moléculas de colorantes e inducen la formación de agregados de tipo *H* y *J* (Song y col., 2017). La interacción entre las películas de materiales

grafénicos y moléculas de colorante puede modificar las propiedades vibracionales y de fluorescencia del colorante. Por ejemplo, De la O Cuevas y colaboradores observaron el apagamiento de la fluorescencia y una amplificación de la respuesta vibracional en moléculas de un colorante tipo BODIPY. Estos cambios resultan de las interacciones π - π entre los dominios formados por carbonos sp^2 del sustrato grafénico y los núcleos aromáticos del fluoróforo BODIPY (De la O-Cuevas y col., 2021). La técnica de Langmuir-Blodgett también permite preparar nanocompuestos de óxido de grafeno y Cu_2O o Cu complejando el óxido de grafeno con iones Cu^{2+} en la interfase agua-aire, una vez que la película ha sido depositada sobre un sustrato se produce la formación del óxido de cobre mediante tratamiento térmico. La principal ventaja de este método es que permite obtener una distribución uniforme de las partículas de óxido de cobre o cobre a lo largo de toda la película (Botcha y col., 2018).

La técnica de Langmuir-Blodgett también puede ser aplicada exitosamente para la fabricación de dispositivos electrocrómicos como las ventanas inteligentes de alto desempeño a partir de óxido de grafeno y óxido de molibdeno ya que permite obtener películas delgadas con espesor uniforme donde existe una fuerte interacción entre el óxido de grafeno y el óxido de molibdeno que confiere una alta capacidad de coloración y buena reversibilidad (Zhang y col., 2016).

La sobre compresión de una monocapa de óxido de grafeno en la interfase agua-aire causa el plegamiento de la monocapa de forma repetitiva y periódica de forma similar a como se arruga una hoja de papel. Los dobleces formados se conservan en la monocapa durante la transferencia a un sustrato sólido e incluso después de procesos posteriores como la reducción química (Silverberg & Vecitis, 2017). El plegamiento de monocapas de grafeno es una aproximación interesante para la obtención de nanoestructuras porosas. La deposición de múltiples capas de óxido de grafeno comprimidas más allá de la presión de colapso resulta en la formación de una nanoestructura altamente porosa con una estructura tridimensional. La porosidad de estos materiales se encuentra interconectada y es una plataforma

ideal para el almacenamiento de biomateriales dentro de los poros. Además, se ha encontrado que las nanoestructuras porosas de óxido de grafeno ayudan a la comunicación celular, transporte de nutrientes y oxígeno y eliminación de residuos del metabolismo celular. Por lo tanto, las nanoestructuras porosas de óxido de grafeno resultan adecuadas para construir bioelectrodos, y biosensores entre otros dispositivos (Jaafar y col., 2015).

Respecto a las propiedades eléctricas de las películas de Langmuir-Blodgett de óxido de grafeno, se ha encontrado que para obtener la conductividad en el plano en electrodos es necesario formar conjunciones entre las láminas de óxido de grafeno (Han, 2015). Esto puede ser logrado fácilmente durante la compresión controlada de la monocapa en la interfase agua aire.

Películas de LB a base de redes metal-orgánicas

Otra clase de materiales nanoestructurados con relevancia tecnológica en la actualidad son las redes metal-orgánicas conocidas comúnmente como MOFs. Estos sólidos cristalinos formados por átomos o cúmulos metálicos y conectores orgánicos destacan por sus poros nanoestructurados y han encontrado aplicaciones en la adsorción, catálisis, biomedicina, y generación de energía. La fabricación de películas de Langmuir-Blodgett con MOFs puede realizarse a partir de suspensiones de partículas que se dispersan en la interfase agua-aire o bien sintetizando *in situ* los MOFs en la subfase agua.

La implementación de la técnica de Langmuir-Blodgett con partículas de MOFs requiere que estas se encuentren recubiertas con un surfactante que les permita permanecer en una suspensión. De esta forma las partículas de MOFs pueden mantenerse flotando en la interfase agua-aire y durante el proceso de autoensamblaje (Yuan y col., 2021). La caracterización de las películas obtenidas muestra que la cristalinidad y porosidad intrínsecas de los MOFs se conservan en las películas resultantes (Andrés y col., 2019).

La síntesis de MOFs *in situ* se realiza disolviendo los iones metálicos en la subfase agua y dispersando sobre ella una solución que contiene al ligante. Este método ha sido aplicado para sintetizar un MOF de níquel (II) y 2,3,6,7,10,11-hexaaminotriphenileno y formar posteriormente nanopelículas con un alto grado de cristalinidad y elevada conductividad eléctrica (Ohata y col., 2021). Este método también ha sido aplicado para obtener MOFs en las interfase agua-aire a partir de ligantes derivados de porfirina (Liu y col., 2019). La principal ventaja de este método es que los MOFs obtenidos forman nanoláminas con un elevado grado de orientación, ya que debido a las fuerzas hidrofóbicas y a las interacciones π - π el plano basal de las nanoláminas permanece paralelo al plano de la subfase agua (Wang y col., 2021). La planaridad de las estructuras formadas mejora algunas propiedades como la capacidad de transporte de cargas haciendo de estos materiales alternativas prometedoras para el desarrollo de nuevos semiconductores (Rubio-Giménez y col., 2018).

Desafíos y retos de la técnica de Langmuir-Blodgett

Hasta este punto, se ha mostrado la gran versatilidad de la técnica de Langmuir-Blodgett para la construcción de películas delgadas a partir de diferentes nanomateriales. En la actualidad, esta técnica ha superado las limitaciones impuestas por el uso exclusivo de moléculas anfifílicas y se ha diversificado su aplicabilidad a una amplia gama de sustancias orgánicas, organometálicas e inorgánicas. Podemos anticipar que en el futuro la técnica podrá aplicarse a una gama aún más amplia de materiales y por consecuencia, las aplicaciones potenciales de las películas delgadas fabricadas por esta técnica aumentarán, también, de manera significativa.

Sin embargo, uno de los desafíos más importantes que enfrenta la técnica de Langmuir-Blodgett es su adaptación a la producción en masa. La mayor parte de las investigaciones realizadas se han llevado a cabo a escala de laboratorio y los equipos disponibles en el mercado ofrecen una capacidad limitada. Como se

mencionó anteriormente, la técnica de Langmuir-Blodgett se ha combinado con otras técnicas como el recubrimiento por rodillo para aumentar su capacidad productiva. No obstante, esta mejora sólo permite aumentar el área sobre la cual es posible depositar la película, pero aún es necesario optimizar otros aspectos de la técnica como el tiempo requerido para formar las monocapas de Langmuir en la interfase agua-aire, o el tiempo muerto que existe entre el depósito de dos monocapas sucesivas en el mismo sustrato.

Otro aspecto importante, es evitar la formación de defectos estructurales en la película como los mencionados anteriormente. Más allá de la técnica de Langmuir-Blodgett, esta problemática requiere mejorar los métodos de síntesis de las nanoestructuras que serán usadas como bloques de construcción, procurando que sean monodispersas o con baja polidispersidad en cuanto a tamaño.

Por último, uno de los nuevos desafíos que enfrenta la técnica de Langmuir-Blodgett es la formación de películas delgadas con compuestos sintetizados por microorganismos para la obtención de biopelículas.

La técnica de Langmuir-Blodgett es una ventana abierta a la innovación y desarrollo tecnológico. Sin embargo, el desarrollo de esta técnica aún se encuentra limitado enormemente por el difícil acceso a la instrumentación requerida.

Conclusiones

La técnica de Langmuir-Blodgett es una técnica sumamente versátil para la fabricación de películas nanoestructuradas. Su principal ventaja es la facilidad con la cual se adapta para fabricar nanopelículas a partir de diferentes materiales, partiendo de los materiales moleculares y llegando a los materiales nanoestructurados con diferente dimensionalidad. También, la técnica ofrece la posibilidad de llevar a cabo la síntesis *in situ* de diferentes nanomateriales usando métodos interfaciales. Además, las películas obtenidas mediante la técnica de Langmuir-Blodgett presenta un alto grado de orden, espesor uniforme, morfología regular y otras características que hacen de esta técnica un sustituto potencial para

otras técnicas como el recubrimiento por giro o la deposición química de vapor. Especialmente, cuando se requiere un alto grado de control en las características microestructurales de las películas. Sin embargo, esta técnica aun encuentra muchas limitaciones para adaptarse a la producción masiva haciéndola menos competitiva desde el punto de vista económico. No obstante, en muchos casos la técnica de Langmuir-Blodgett puede ser la única que permita obtener nanopelículas con ciertas características, especialmente cuando se trata de películas multicapa que combinan materiales de naturaleza muy diversa. Esto permitiría colocar a la técnica de Langmuir-Blodgett en un nicho competitivo donde se compense el alto costo-beneficio que ésta tiene. Podemos esperar que en futuro esta técnica adquiera mayor relevancia, cuando sus limitaciones productivas sean superadas y, especialmente, de cara a la tendencia actual, hacia la miniaturización tecnológica.

Bibliografía

- Abdulla, S., & Pullithadathil, B. (2020). Unidirectional langmuir-blodgett-mediated alignment of polyaniline-functionalized multiwalled carbon nanotubes for NH₃ gas sensor applications. *Langmuir*, 36(39), 11618–11628. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c02200>
- Alaferdov, A. V, Savu, R., Canesqui, M. A., Bortolucci, E., Joanni, E., Peressinoto, J., & Moshkalev, A. (2017). Graphite nanobelts characterization and application for blood pulse sensing. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 8, 5. <https://doi.org/10.1051/ijmqe/2017003>
- Alejo, T., Paulo, P. M. R., Merchán, M. D., Garcia-Fernandez, E., Costa, S. M. B., & Velázquez, M. M. (2017). Influence of 3D aggregation on the photoluminescence dynamics of CdSe quantum dot films. *Journal of Luminescence*, 183, 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2016.11.002>
- Amer, M. S., & Altalebi, H. B. (2018). On the processing of monolayer C60

fullerene films and their mechanical properties. *Materials Research Express*, 5, 016407. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaa21d>

Andrés, M. A., Sicard, C., Serre, C., Roubeau, O., & Gascón, I. (2019). Ultrathin hydrophobic films based on the metal organic framework UiO-66-COOH(Zr). *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 10, 654–665. <https://doi.org/10.3762/BJNANO.10.65>

Ariga, K. (2020). Don't Forget Langmuir-Blodgett Films 2020: Interfacial Nanoarchitectonics with Molecules, Materials, and Living Objects. *Langmuir*, 36(26), 7158–7180. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c01044>

Banchelli, M., Tiribilli, B., Pini, R., Matteini, P., & Caminati, G. (2015). Graphene oxide/silver nanocube composites for SERS detection of biomolecules. *International Conference on BioPhotonics*, 1–3. <https://doi.org/10.1109/BioPhotonics.2015.7304046>

Bodik, M., Siffalovic, P., Nadazdy, P., Benkovicova, M., Markovic, Z., Chlpik, J., Cirak, J., Kotlar, M., Micusik, M., Jergel, M., & Majkova, E. (2018). On the formation of hydrophobic carbon quantum dots Langmuir films and their transfer onto solid substrates. *Diamond and Related Materials*, 83, 170–176. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2018.02.011>

Botcha, V. D., Sutar, D. S., & Major, S. S. (2018). Study of GO-Cu₂O and RGO-Cu nanocomposite monolayer sheets prepared by modified Langmuir Blodgett route. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 118, 158–165. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2018.03.012>

Bursa, B., Rytel, K., Skrzypiec, M., Prochaska, K., & Wróbel, D. (2018). Thin films of CdTeSe/ZnS quantum dots on water subphase: Thermodynamics and morphology studies. *Dyes and Pigments*, 155, 36–41. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2018.01.035>

- Camacho, S. A., Aoki, P. H. B., De Assis, F. F., Pires, A. M., De Oliveira, K. T., Aroca, R. F., & Constantino, J. L. (2015). Co-deposition of gold nanoparticles and metalloporphyrin using the Langmuir-Blodgett (LB) technique for surface-enhanced Raman scattering (SERS). *Applied Spectroscopy*, 69(4), 451–456. <https://doi.org/10.1366/14-07625>
- Cao, W., Lin, Y., Patterson, R., Wen, X., Tapping, P. c, Kee, T., Veetil, B. P., Zhang, P., Zhang, Z., Zhang, Q., Reece, P., Bremner, S., Santosh, S., Conibeer, G., & Huang, S. (2017). Difference in hot carrier cooling rate between Langmuir-Blodgett and drop cast PbS QDs films due to strong electron-phonon coupling. *Nanoscale*, 9(43), 17133–17142. <https://doi.org/10.1039/C7NR05247B>
- Chen, K., Li, J., Xing, R., Jiao, T., Gao, F., & Peng, Q. (2018). Facile synthesis of self-assembled carbon nanotubes/dye composite films for sensitive electrochemical determination of Cd(II) ions. *Nanotechnology*, 29(44), 445603. <https://doi.org/https://doi.org/10.1088/1361-6528/aadbf7>
- Chen, Y., Su, H., Hung, C., Yang, P., Hu, Y., Lin, T., Lee, M., & Jeng, U. (2017). X-ray reflectivity studies on the mixed Langmuir-Blodgett monolayers of thiol-capped gold nanoparticles, dipalmitoylphosphatidylcholine, and sodium dodecyl sulfate. *Langmuir*, 33(41), 10886–10897. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b01559>
- Chung, S. (2017). Two-dimensional assembly of organically functionalized Ag nanoparticles at air-water interface. *Applied Chemistry for Engineering*, 28(1), 125–131. <https://doi.org/10.14478/ace.2017.1001>
- De la O-Cuevas, E., Alvarez-Venicio, V., Badillo-Ramírez, I., Islas, S. R., Carreón-Castro, M. del P., & Saniger, J. M. (2021). Graphenic substrates as modifiers of the emission and vibrational responses of interacting molecules: The case of BODIPY dyes. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular*

Spectroscopy, 246, 119020. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.119020>

Devanarayanan, V. P., Manjuladevi, V., Poonia, M., Gupta, R. K., Gupta, S. K., & Akhtar, J. (2016). Measurement of optical anisotropy in ultrathin films using surface plasmon resonance. *Journal of Molecular Structure*, 1103, 281–285. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2015.09.018>

Ermakova, E. V., Ezhov, A. A., Baranchikov, A. E., Gorbunova, Y. G., Kalinina, M. A., & Arslanov, V. V. (2018). Journal of Colloid and Interface Science Interfacial self-assembly of functional bilayer templates comprising porphyrin arrays and graphene oxide. *Journal of Colloid And Interface Science*, 530, 521–531. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.06.086>

Gao, Y., Deng, Y., Liao, Z., & Zhang, M. (2017). Aligned carbon nanotube field effect transistors by repeated compression-expansion cycles in Langmuir-Blodgett. *Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Nanotechnology*, 731–734. <https://doi.org/10.1109/NANO.2017.8117288>

Gür, B., Sinoforoglu, M., & Meral, K. (2015). Fabrication of morphology controlled graphene oxide-dye composite films at the air water interface. *RSC Advances*, 5(1), 552–557. <https://doi.org/10.1039/b000000x>

Han, T. H. (2015). Direct assembly of graphene oxide on flexible substrates for highly transparent electrodes via the Langmuir-Blodgett technique. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 15(2), 1191–1194. <https://doi.org/10.1166/jnn.2015.9318>

Hirata, N., Sato, M., Tsunemi, E., Watanabe, Y., Tsunoyama, H., Nakaya, M., Eguchi, T., Negishi, Y., & Nakajima, A. (2016). Fabrication and characterization of floating memory devices based on thiolate-protected gold nanoclusters. *Journal of Physical Chemistry C*, 121(20), 10638–10644. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b09339>

- Ibrahim, S. A., Jaafar, M. M., Ng, F. L., Phang, S. M., Kumar, G. G., Majid, W. H. A., & Periasamy, V. (2018). Plasma-treated Langmuir–Blodgett reduced graphene oxide thin film for applications in biophotovoltaics. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 124, 59. <https://doi.org/10.1007/s00339-017-1468-2>
- Ibrayev, N., Seliverstova, E., & Zhumabekov, A. (2018). Preparation of graphene nanostructured films for photovoltaics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 447, 012068. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/447/1/012068>
- Jaafar, M. M., Ciniciato, G. P. M. K., Ibrahim, S. A., Phang, S. M., Yunus, K., Fisher, A. C., Iwamoto, M., & Vengadesh, P. (2015). Preparation of a three-dimensional reduced graphene oxide film by using the Langmuir-Blodgett method. *Langmuir*, 31(38), 10426–10434. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.5b02708>
- Jadhav, A. H., Patil, S. H., Sathaye, S. D., & Patil, K. R. (2015). A method to form semiconductor quantum dot (QD) thin films by igniting a flame at air–liquid interface: CdS and WO₃. *Journal of Colloid and Interface Science*, 439, 121–128. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2014.10.029>
- Karthik, C., Manjuladevi, V., & Gupta, R. K. (2016). Langmuir monolayer assisted formation of cadmium sulfide nanoparticles at air-water interface and its role in alignment of bulk liquid crystal. *RSC Advances*, 6(52), 46607–46615. <https://doi.org/10.1039/C6RA01753C>
- Kim, Y.-H., Dong, L., Osada, M., Li, B. W., Ebina, Y., & Sasaki, T. (2015). Artificial design for new ferroelectrics using nanosheet-architectonics concept. *Nanotechnology*, 26(24), 244001. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/26/24/244001>

- Kohoutek, T., Parchine, M., Bardosova, M., Fudouzi, H., & Pemble, M. (2018). Large-area flexible colloidal photonic crystal film stickers for light trapping applications. *Optical Materials Express*, 8(4), 960–967. <https://doi.org/10.1364/OME.8.000960>
- Kuo, T.-R., Chen, Y.-C., Wang, C.-I., Shen, T.-H., Wang, H.-Y., Pan, X.-Y., Wang, D.-Y., Liou, C.-C., Chang, Y.-H., Chen, Y. C., Wu, Y. H., Liu, Y. R., Lin, Y. H., Hu, C. C., & Chen, C. C. (2017). Highly oriented Langmuir-Blodgett film of silver cuboctahedra as an effective matrix-free sample plate in surface-assisted laser desorption/ionization mass spectrometry. *Nanoscale*, 9(31), 11119–11125. <https://doi.org/10.1039/C7NR04098A>
- Lin, G., & Lu, W. (2017). Self-assembly of hydrophobic gold nanoparticles and adhesion property of their assembled monolayer films. *Journal of Colloid And Interface Science*, 501, 241–247. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.04.065>
- Liu, C., Wang, C., Wang, H., Wang, T., & Jiang, J. (2019). Photoactive Porphyrin-Based Metal-Organic Framework Nanosheets. *European Journal of Inorganic Chemistry*, 2019(45), 4815–4819. <https://doi.org/10.1002/ejic.201900940>
- Liu, Q., & Wang, X. (2020). Polyoxometalate Clusters: Sub-nanometer Building Blocks for Construction of Advanced Materials. *Matter*, 2(4), 816–841. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2020.01.020>
- Mahmoud, M. A. (2016). Overgrowth of silver nanodisks on a substrate into vertically aligned nanopillars for chromatic light polarization. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8(36), 23827–23836. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b07311>
- Matyszewska, D., Napora, E., Żelechowska, K., Biernat, J. F., & Bilewicz, R. (2018). Synthesis , characterization , and interactions of single-walled carbon nanotubes modified with doxorubicin with Langmuir-Blodgett biomimetic

membranes. *Journal of Nanoparticle Research*, 20(5), 143.

<https://doi.org/10.1007/s11051-018-4239-x>

Meng, Q., Honda, N., Uchida, S., Hashimoto, K., Shibata, H., & Fujimori, A. (2015).

Creation of giant two-dimensional crystal of zinc oxide nanodisk by method of single-particle layer of organo-modified inorganic fine particles. *Journal of Colloid And Interface Science*, 453, 90–99.

<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2015.04.058>

Nakamura, K., Kuriyama, N., Takagiwa, S., Sato, T., & Kushida, M. (2016). Film fabrication of Fe or Fe₃O₄ nanoparticles mixed with palmitic acid for vertically aligned carbon nanotube growth using Langmuir-Blodgett technique.

Japanese Journal of Applied Physics, 55, 03DD06.

<https://doi.org/10.7567/JJAP.55.03DD06>

Neal, E. A., & Nakanishi, T. (2021). Alkyl-Fullerene Materials of Tunable

Morphology and Function. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 94(6), 1769–1788. <https://doi.org/10.1246/bcsj.20210129>

Noskov, B. A., Timoshen, K. A., Akentiev, A. V., Chirkov, N. S., Dubovsky, I. M., Lebedev, V. T., Lin, S. Y., Loglio, G., Miller, R., Sedov, V. P., & Borisenkova, A. A. (2019). Dynamic Surface Properties of Fullerenol Solutions [Research-article]. *Langmuir*, 35(10), 3773–3779.

<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b04152>

Ohata, T., Nomoto, A., Watanabe, T., Hirosawa, I., Makita, T., Takeya, J., & Makiura, R. (2021). Uniaxially Oriented Electrically Conductive Metal–Organic Framework Nanosheets Assembled at Air/Liquid Interfaces. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(45), 54570–54578.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acsami.1c16180>

Ou, K., Xu, X., Shao, Y., Wang, W. J., Zhang, W. Bin, & Yang, S. G. (2019).

- Langmuir-Blodgett Films of C60-end-capped Poly(ethylene oxide). *Chinese Journal of Polymer Science*, 37, 604–608. <https://doi.org/10.1007/s10118-019-2234-z>
- Parchine, M., Mcgrath, J., Bardosova, M., & Pemble, M. E. (2016). Large area 2D and 3D colloidal photonic crystals fabricated by a roll-to-roll Langmuir-Blodgett method. *Langmuir*, 32(23), 5862–5869. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.6b01242>
- Paulista Neto, A. J., & Fileti, E. E. (2018). Elucidating the amphiphilic character of graphene oxide. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 20(14), 9507–9515. <https://doi.org/10.1039/c8cp00797g>
- Ramesan, A. B., Vittala, S. K., & Joseph, J. (2022). DNA condensation and formation of ultrathin nanosheets via DNA assisted self-assembly of an amphiphilic fullerene derivative. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 226, 112352. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2021.112352>
- Ramli, M. M., Isa, S. S. M., Ahmad Hambali, N. A. M., Isa, M. M., Kasjoo, S. R., Nor, N. I. M., Ahmad, N., Khalid, N., Murad, S. A. Z., & Isa, M. N. (2016). Carbon nanotubes based hydrogen sensor on paper using Langmuir-Blodgett technique. *3rd International Conference on Electronic Design*, 387–390.
- Rodrigues, R. T., Morais, P. V, Nordi, C. S. F., Scho, M. J., Siqueira, J. R., & Caseli, L. (2018). Carbon Nanotubes and Algal Polysaccharides To Enhance the Enzymatic Properties of Urease in Lipid Langmuir – Blodgett Films. *Langmuir*, 34(9), 3082–3093. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b04317>
- Rodrigues Rola Possarle, L. H., Siqueira Junior, J. R., & Caseli, L. (2020). Insertion of carbon nanotubes in Langmuir-Blodgett films of stearic acid and asparaginase enhancing the catalytic performance. *Colloids and Surfaces B:*

Biointerfaces, 192, 111032. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2020.111032>

Rubio-Giménez, V., Galbiati, M., Castells-Gil, J., Almora-Barrios, N., Navarro-Sánchez, J., Escorcia-Ariza, G., Mattera, M., Arnold, T., Rawle, J., Tatay, S., Coronado, E., & Martí-Gastaldo, C. (2018). Bottom-Up Fabrication of Semiconductive Metal–Organic Framework Ultrathin Films. *Advanced Materials*, 30(10), 1704291. <https://doi.org/10.1002/adma.201704291>

Sato, T., Nakamura, K., Takagiwa, S., & Kushida, M. (2016). Controlling the morphology of vertically-aligned carbon nanotubes using Langmuir-Blodgett deposited CoFe₂O₄, Fe₃O₄, and Fe nanoparticles with palmitic acid. *Thin Solid Films*, 616, 662–672. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2016.09.033>

Sawalha, S., Milano, F., Guascito, M. R., Bettini, S., Giotta, L., Operamolla, A., Da Ros, T., Prato, M., & Valli, L. (2020). Improving 2D-organization of fullerene Langmuir-Schäfer thin films by interaction with cellulose nanocrystals. *Carbon*, 167, 906–917. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.05.084>

Scholl, F., Morais, P., Gabriel, R., Schöning, M. J., Roberto, J., Jr, S., & Caseli, L. (2017). Carbon nanotubes arranged as smart interfaces in lipid Langmuir-Blodgett films enhancing the enzymatic properties of penicillinase for biosensing applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(36), 31054–31066. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b08095>

Sharma, A., Kumar, M., & Dhar, B. (2016). Quantum dot monolayer for surface plasmon resonance signal enhancement and DNA hybridization detection. *Biosensors and Bioelectronics*, 80, 477–482. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2016.02.013>

Shi, L., Liu, J., Yang, J., Cai, L., Shi, L., & Qiu, H. (2017). Langmuir-Blodgett assembly of transparent graphene oxide-silver microwire hybrid films with an antibacterial property. *New Carbon Materials*, 32(4), 344–351.

[https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(17\)60127-6](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(17)60127-6)

Silverberg, G. J., & Vecitis, C. D. (2017). Wrinkling and periodic folding of graphene oxide monolayers by Langmuir-Blodgett compression. *Langmuir*, 33, 9880–9888. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b02289>

Song, J., Ma, K., Jiao, T., Xing, R., Zhang, L., & Zhou, J. (2017). Preparation and self-assembly of graphene oxide-dye composite Langmuir films: Nanostructures and aggregations. *Colloids and Surfaces A*, 529, 793–800. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.06.071>

Swierczewski, M., Maroni, P., Chenneviere, A., Dadras, M., Lee, L., Bürgi, T., Swierczewski, M., Maroni, P., Chenneviere, A., Dadras, M., & Lee, L. (2021). Deposition of extended ordered ultrathin films of Au₃₈(SC₂H₄Ph)₂₄ nanocluster using Langmuir – Blodgett technique. *Small*, 17(27), 2005954. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/sml.202005954>

Takagiwa, S., Kanasugi, O., Nakamura, K., & Kushida, M. (2016). Synthesis of vertically-aligned carbon nanotubes from Langmuir-Blodgett films deposited Fe Nanoparticles on Al₂O₃/Al/SiO₂/Si substrate. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 16(4), 3289–3294. <https://doi.org/10.1166/jnn.2016.12312>

Tamiya, S., Sato, T., & Kushida, M. (2018). Diameter control of vertically aligned carbon nanotubes using CoFe₂O₄ nanoparticle Langmuir-Blodgett films. *Japanese Journal of Applied Physics*, 57(3S2), 03EG15. <https://doi.org/10.7567/JJAP.57.03EG15>

Tomasevic-Ilic, T., Pesic, J., Milosevic, I., Vujin, J., Matkovic, A., Spasenovic, M., & Gajic, R. (2016). Transparent and conductive films from liquid phase exfoliated graphene. *Optical and Quantum Electronics*, 48, 319. <https://doi.org/10.1007/s11082-016-0591-1>

Tomasevic Ilic, T., Jovanovic, D., Popov, I., Fandan, R., Pedrós, J., Spasenovic,

- M., & Gajic, R. (2018). Reducing sheet resistance of self-assembled transparent graphene films by defect patching and doping with UV/ozone treatment. *Applied Surface Science*, 458, 446–453.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.07.111>
- Ukleev, V., Khassanov, A., Snigireva, I., Konovalov, O., Dudnik, M., Dubitskiy, I., & Vorobiev, A. (2017). Self-assembly of a binary mixture of iron oxide nanoparticles in Langmuir film: X-ray scattering study. *Materials Chemistry and Physics*, 202, 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.08.069>
- Wang, Z., Walter, L. S., Wang, M., Petkov, P. S., Liang, B., Qi, H., Nguyen, N. N., Hamsch, M., Zhong, H., Wang, M., Park, S., Renn, L., Watanabe, K., Taniguchi, T., Mannsfeld, S. C. B., Heine, T., Kaiser, U., Zhou, S., Weitz, R. T., ... Dong, R. (2021). Interfacial Synthesis of Layer-Oriented 2D Conjugated Metal-Organic Framework Films toward Directional Charge Transport. *Journal of the American Chemical Society*, 143(34), 13624–13632.
<https://doi.org/10.1021/jacs.1c05051>
- Wu, Y.-H., Imae, T., & Ujihara, M. (2017). Surface enhanced plasmon effects by gold nanospheres and nanorods in Langmuir-Blodgett films. *Colloids and Surfaces A*, 532, 213–221. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.05.015>
- Wu, Y., Kou, J., Wang, L., Cheng, L., & Lu, K. (2019). Langmuir-blodgett films of naflon-nitrogen doped carbon nanotubes as new sensing materials for the determination of caffeine in tea. *International Journal of Electrochemical Science*, 14, 11166–11177. <https://doi.org/10.20964/2019.12.50>
- Xiao, P., Gu, J., Wan, C., Wang, S., He, J., Zhang, J., Huang, Y., Kuo, S. W., & Chen, T. (2016). Ultrafast formation of free-standing 2D carbon nanotube thin films through capillary force driving compression on air/water interface. *Chemistry of Materials*, 28(19), 7125–7133.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.6b03420>

- Xiao, W., Liu, J., Xiong, Y., Li, Y., & Li, H. (2021). Fluorescent sensing of free bilirubin at nanomolar level using a Langmuir–Blodgett film of glucuronic acid–functionalized gold nanoclusters. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 413, 7009–7019. <https://doi.org/10.1007/s00216-021-03660-6>
- Yahya, P., Theng, L. L., Mustaza, S. M., Abdullah, H., & Amin, N. (2017). Characterization of transparent conducting carbon nanotube thin films prepared via different methods. *Sains Malaysiana*, 46(7), 1103–1109. <https://doi.org/10.17576/jsm-2017-4607-13>
- Yoo, S., Kim, J., Moon, H., Kim, S. Y., Ko, D.-S., Shin, W. H., Hwang, S., Jung, D. W., Sul, S., Kwak, C., Roh, J. W., & Lee, W. (2017). Strong enhancement of electrical conductivity in two-dimensional micrometer-sized RuO₂ nanosheets for flexible transparent electrodes. *Nanoscale*, 9(21), 7104–7113. <https://doi.org/10.1039/c6nr09894k>
- Yuan, H., Liu, G., Qiao, Z., Li, N., Buenconsejo, P. J. S., Xi, S., Karmakar, A., Li, M., Cai, H., Pennycook, S. J., & Zhao, D. (2021). Solution-Processable Metal–Organic Framework Nanosheets with Variable Functionalities. *Advanced Materials*, 33(29), 2101257. <https://doi.org/10.1002/adma.202101257>
- Zhang, H., Jeon, K., & Seo, D. (2016). Equipment-free deposition of graphene-based molybdenum oxide nanohybrid Langmuir-Blodgett films for flexible electrochromic panel application. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8(33), 21539–21544. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b04985>
- Zhang, Y., Xu, L., Walker, W. R., Tittle, C. M., Backhouse, C. J., & Pope, M. A. (2017). Langmuir films and uniform, large area transparent coatings of chemically exfoliated MoS₂ single layers. *Journal of Materials Chemistry C*, 5, 11275–11287. <https://doi.org/10.1039/C7TC02637D>
- Zheng, Q., Wang, J., Wang, Y., & Chen, Z. (2018). Novel molybdenum disulfide

Langmuir Blodgett thin film as a saturable absorber for a passively Q-switched Nd:GdVO₄ laser. *Optical Materials Express*, 8(10), 3176–3183.
<https://doi.org/10.1364/OME.8.003176>

Cambios de uso de suelo y aglomeración urbana en Tlaxco, Tlaxcala

Land use changes and urban agglomeration in Tlaxco, Tlaxcala

Mayela Montserrat **Gutiérrez-Carreón**; Nancy **Sierra-López**; Ramos **Montalvo-Vargas**

Autor para correspondencia: Dr. Ramos Montalvo Vargas, correo electrónico rmontalvovargas@gmail.com, teléfono celular 241 166 0313, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-2385-5437>

Mayela Montserrat Gutiérrez-Carreón. *Maestra en Desarrollo Regional en El Colegio de Tlaxcala A. C., Av. Melchor Ocampo No. 28, San Pablo Apetatitlán, Tlaxcala, C.P. 90600, correo electrónico: mm.gcarreon@live.com.mx*

Nancy Sierra-López. *Coordinadora de Planeación de la Facultad de Geografía UAEMex, Maestra en Ciencias Ambientales. Cerro de Coatepec s/n, Ciudad Universitaria, Toluca, Edo. De México, C.P. 50110, correo electrónico: nansysie@yahoo.com.mx*

Ramos Montalvo-Vargas. *Doctor en Desarrollo Regional. Profesor investigador de la Universidad Autónoma de Tlaxcala (UATx), Doctor en Desarrollo Regional. Av. Universidad No. 1, Ciudad Universitaria, Tlaxcala, C. P. 90000, correo electrónico: rmontalvovargas@gmail.com*

Resumen

La región de Tlaxcala se encuentra ubicada en el Altiplano Central de México, su localización estratégica y su relación directa con el área metropolitana de la Ciudad de México y con el estado de Puebla, influyen en la configuración actual del territorio. A partir de los años 70, Tlaxcala se vio inmersa en un proceso de industrialización acelerada; y para los años 90, el estado centró sus actividades económicas en el sector secundario y terciario. Aunado a esto el crecimiento de las ciudades también se hizo evidente, y tal como lo documentan algunos autores pese a la precariedad de los servicios urbanos disponibles, un cierto número de ciudades continúan atrayendo a nuevos habitantes. La zona de estudio se ubica en Tlaxco, el municipio más grande de Tlaxcala, el crecimiento de esta ciudad de 1973 hasta el 2017, ha sido de 12 veces su tamaño original; sin embargo, en el periodo 2000 – 2010 se muestra la mayor expansión y aglomeración. En esa transición, es palpable el crecimiento desarticulado en los procesos de expansión urbana, debido a que las labores de actualización de los usos y destinos de suelo ocurren en espacios concretos; mientras que las autoridades definen esquemas de gobierno centrados en un protagonismo burocrático, alejado de la realidad para la correcta ejecución de la política territorial. Con la expansión física de la ciudad, el territorio de Tlaxco se ha visto afectado por los cambios de uso de suelo y el deterioro ambiental, pues las crecientes ampliaciones del espacio habitacional se han establecido en zonas de cubierta vegetal lo que también ha derivado en la reducción de especies de flora y fauna, generando entonces alteraciones en los ecosistemas.

Palabras clave: Uso de suelo, expansión urbana, transformaciones socio-territoriales.

Abstract

The region of Tlaxcala is located in the Central highlands of Mexico, its strategic location and its direct relationship with the metropolitan area of Mexico City and the state of Puebla, influence the current configuration of the territory. From the years 70, Tlaxcala was immersed in a process of accelerated industrialization; and by the years 90, the State focused its economic activities in the secondary and tertiary sectors. In addition to this, the growth of cities also became evident, and as documented by some authors despite the precariousness of the urban services available, a certain number of cities continue to attract new habitants. With the physical expansion of the city, the territory of Tlaxco has been affected by changes in land use and environmental deterioration, as the increasing extensions of the housing area have been established in areas of vegetation cover which has also resulted in the reduction of species of flora and fauna, thus generating alterations in the ecosystems.

Key words: *Land use, urban expansion, socio-territorial transformations.*

Introducción

La tendencia de las rápidas y profundas transformaciones resultantes por los cambios en el uso del suelo y de la vegetación en el entorno, así como las consecuencias que se han generado, son uno de los temas de mayor interés en las disciplinas ambientales de la actualidad. Sin embargo, más allá de la preocupación medio ambiental, radica en el ejercicio científico de advertir que todo cambio en el uso de suelo dada la naturaleza del espacio, su organización y producción, está alterando su genética, cuya velocidad de adaptación y resiliencia es menor a los cambios que producen las modificaciones, cambios y alteraciones que sufre el suelo por las decisiones de uso privadas, públicas y sociales.

Las transiciones territoriales, son procesos cada vez más acelerados y depredatorios de los recursos que modifican la vocación del espacio y el territorio. En este trabajo se analizan los usos de suelo del municipio de Tlaxco, está ubicado

en el norte de la entidad y tiene la mayor extensión territorial del estado de Tlaxcala con 537.39 km². Un estudio realizado por Montalvo y col. (2017) lo considera como el segundo con mayor potencial para el desarrollo regional en Tlaxcala y alberga una de las tres reservas naturales en la entidad federativa. Las otras dos reservas naturales son: 1. La Malinche, donde están involucrados 10 municipios de Tlaxcala: Acuamanala, Chiautempan, Contla, Huamantla, Ixtenco, Mezatecochco, San Pablo del Monte, Teolocholco, Tzompantepec y Zitlatepec; y, la tercera reserva se localiza en la región poniente en los municipios de Calpulalpan y Nanacamilpa.

Se parte del supuesto de que los componentes más frágiles del territorio son susceptibles a un deterioro más acelerado y su propensión a ser alterados, obedece a una intervención humana carente de fundamentos institucionales de planificación, ordenación, gestión y administración principalmente del espacio más próximo a los asentamientos humanos; de aquí se desprende la pregunta guía del presente trabajo, que consiste en contestar ¿cuáles son los suelos que sufren la mayor pérdida en el tiempo?.

El propósito del documento, es presentar un balance del proceso de transformación de Tlaxco, municipio galardonado el 25 de septiembre de 2015 con la categoría de “Pueblo Mágico”, por la Secretaría de Turismo del Gobierno Federal; y, que por la relevancia de la actividad en el país, las dinámicas propias del sector advierten cambios no sólo en la transformación y reconversión de las actividades ligadas a la economía local, sino a los cambios propios del espacio urbano en proceso de consolidación. A raíz de la denominación de Pueblo Mágico, si bien el incremento de turistas se incrementó, la afluencia no ha sido la esperada.

Los resultados ratifican que es el suelo destinado a la agricultura, el que tiene más pérdida, no sólo porque tiene la mayor vocación y ocupación en el municipio, sino porque es la actividad que presenta mayor vulnerabilidad y riesgo para los productores, lo que provoca un alejamiento, olvido progresivo; y por tanto, una transformación con mayor velocidad en el tiempo.

Consideraciones teóricas

El Ordenamiento Territorial (OT) en América Latina se considera un instrumento administrativo más que una herramienta de planificación del desarrollo; y, quienes lo adoptan como mecanismo para la planificación del uso de suelo como es el caso de México, Colombia, Chile o Argentina, conciben al OT como instrumento político-ambiental (Pereira, 2018).

Otro instrumento es la planificación del territorio, entendida como un proceso que busca integrar, delimitar los espacios públicos y privados, definir un patrón de uso y zonificación para mejor organización y funcionamiento del espacio disponible. Mientras tanto, el planeamiento urbano, entendido como la aplicación de la planificación, se considera un instrumento de desarrollo urbano, normativo y que garantiza la dotación adecuada de servicios, infraestructura y equipamiento comunitario (Pujadas y Font, 1998).

Un cambio en el uso del suelo se presenta cuando éste se manipula físicamente (Richters, 1995); y, para que esto suceda, hay una intervención humana que provoca transformaciones en la naturaleza. En el momento que el hombre interfiere en su entorno, se apropia y hace uso de sus recursos con la finalidad de atender necesidades propias de su existencia.

La medición en los cambios de uso de suelo, normalmente se realizan sobre archivos digitales generados mediante percepción remota (usualmente, fotografías aéreas e imágenes de satélite) o cartografía temática de cobertura, este proceso muestra transiciones, deterioros, ganancias y pérdidas en los tipos elegidos para el análisis: sin embargo, se sugiere hacer el análisis espacial en software de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Para el caso del presente documento se utilizaron imágenes satelitales que permitieron analizar el espacio y representar en cartografía, bloques temáticos como agricultura, bosques, espacio urbano y los diferentes usos de suelo; como resultado, se tiene información para diversos tipos de análisis posteriores (Pérez y col., 2017).

Pontius (2004), desarrolló una metodología donde se calculan pérdidas y ganancias, cambios netos e intercambios entre categorías del uso de suelo; pero también puede haber persistencias; es decir, patrones de repetitividad a través de un método desarrollado por Braimoh (2006), con la finalidad de evaluar el uso de suelo que tiene determinado lugar. Lo anterior, se consigue elaborando una matriz cruzada de dos tiempos, en el caso de la presente investigación, se realizó con el año 1990 y 2000.

Para Bocco y col. (2001), el tratamiento y proceso para identificar los cambios de uso y cobertura debe realizarse en tres momentos: primero la identificación e interpretación cartográfica y digital del cambio; segundo, el análisis de los patrones de cambio de cobertura y uso del suelo; y tercero, el análisis de las causas del cambio de uso del suelo. A partir de este ejercicio, se buscan las diferencias espaciales mediante la observación de dos momentos de tiempo sobre los distintos componentes del territorio elegidos como usos de suelo sometidos al análisis de cambio (Rosete, 2007). Para identificar los cambios de uso de suelo, se parte en este documento de la necesidad metodológica por localizar la dispersión o concentración de los componentes en los periodos de tiempo analizados, lo que implica desde un enfoque clásico la organización del espacio.

Debe tenerse especial cuidado en el manejo de los términos espacio, territorio y uso de suelo, para el presente trabajo se entiende el uso del suelo desde un enfoque naturalista como el espacio terrestre referido a la composición de la superficie; esto es, como el medio natural (Souto, 2011) y construido que adopta categorías diferenciadas en su estado natural y modificado.

Debido a que los suelos presentan una amplia variación en el paisaje y se someten a un sistema abierto (Cotler y col., 2007), están expuestos a transformaciones, degradaciones y cambios, algunos son resultado de procesos naturales, otros de intervención antrópica y otros más donde se mezclan ambos factores como el caso de la erosión. El suelo como recurso natural, está expuesto al uso constante; sin embargo, cuando no regulan las protecciones o regulaciones,

es posible que haya consecuencias en aquellos usos de suelo más frágiles por tratarse de espacios proveedores de alimentos o recursos naturales sensibles y necesarios para satisfacer necesidades del ser humano.

Se trata entonces de advertir los cambios en los usos del suelo a partir de entender que los objetos del espacio geográfico son continuos, donde todos tienen sentido en un espacio serial, pero también los elementos componentes en el espacio suponen sistemas, colecciones heredadas del pasado entre generaciones (Santos, 2000). Identificar el cambio significa como lo llamara en su libro clásico Labasse (1973), una forma de organizar el espacio; o, desde un enfoque con tendencia al involucramiento de la voluntad del ser humano, la manera en que se recrea, apropia e identifica; es decir, la forma como se produce el espacio en otro señalamiento clásico de Lefebvre (1974).

Los cambios de uso de suelo y vegetación que se detectan y se hacen presentes, representan formas de adaptación, apropiación e identidad (Guevara y Montalvo, 2014), es la forma como se deja una huella en el espacio que se va modificando parcial y progresivamente. Esas prácticas recurrentes en el caso del ser humano y hechos resultado de fenómenos naturales, demuestran la tendencia generacional de las actividades preponderantes en el quehacer de la humanidad; si la transformación, se da en zonas agrícolas es el sector primario el que sufre esos cambios, puede ocurrir en zonas forestales, urbanas, mineras, entre otras. En todos los casos, los cambios en el uso de suelo, tiene implicaciones severas por cuando hay repercusiones en el entorno natural, su biodiversidad y los efectos sobre los ecosistemas.

Materiales y métodos

Mediante geoprosos con el software *ArcMap* 10.4.1 e *IDRISI Selva*, se trabajaron imágenes satelitales *Landsat Copernicus* correspondientes al municipio Tlaxco, Tlaxcala, en cuatro cortes de tiempo. Se realizaron labores de fotointerpretación y geoprosos que se describen a continuación.

En la primera fase, se agregaron las imágenes satelitales en *ArcMap* de los años 1973, 1980, 1990, 2000, 2010 y 2017, las cuatro fueron georreferenciadas por un método de puntos capturados desde *Google Earth* y trasladados a una hoja de cálculo de Excel; desde *ArcMap* se importó dicha hoja de cálculo, con la herramienta *Create Features X, Y table*, que se encuentra en *Arc Catalog*; se le asignó un sistema de referencia espacial para convertir los puntos en formato *shape*; y, con las funciones de *Georeferencing*, *Add Control Pontis* y *Fit To Display*, se identificaron los puntos que permitieran la sobreposición de las matrices pixelares; para finalizar, se hizo la ubicación de puntos con *Update Display* para tener la georreferenciación en un mismo sistema de proyección. A partir de esas imágenes, se elaboró una tabla de aglomeración urbana y mediante generalización cartográfica, una representación del crecimiento físico en el tiempo.

Sin embargo, después de analizar los atributos de las imágenes de satélite disponibles, únicamente se trabajaron dos imágenes; una de 1990 y otra de 2000, debido a que las características de las demás matrices pixelares difieren en resoluciones y no permiten hacer el comparativo para determinar los cambios de uso del suelo con los mismos parámetros.

En la segunda fase, se empleó el *shape* de los límites municipales de Tlaxco y las imágenes para convertir de vector a raster, con *Conversion Tools, To Raster*, y *Polygon To Raster*. De esta forma, en el módulo *Spatial Analyst Tools* de la caja de herramientas, se usó *Extract* y *Extract to Mask*, para poder cargar la imagen satelital y el límite municipal para delimitar la información requerida. Posteriormente, desde *Arc Toolbox*, en *Spatial Analyst Tools*, con el módulo *Multivariate* y la herramienta *Iso Cluster Unsupervised*, se obtuvieron siete clases que se identificaron con las siguientes categorías: 1. Bosque, 2. Bosque secundario, 3.

Matorral, 4. Otros tipos, 5. Agricultura, 6. Espacio urbano y, 7. Agua. Es importante mencionar que, aunque no es una clasificación supervisada, se hicieron pruebas de validación con un par de expertos conocedores del entorno municipal.

Las categorías se asignaron en la tabla de atributos, donde se agregó un campo para enlistarlas según su correspondencia con el proceso de fotointerpretación. Se asumió como referencia un mapa base del propio *software ArcMap* como fondo del *shape* de interés de cada año, con el que se pudo fotointerpretar el resultado. Al terminar de asignar nombre a las categorías, se guardaron los cambios y se exportó cada imagen en formato *Tagged Image File Format* (TIFF) para continuar el proceso de análisis.

La tercera fase se desarrolló en el software IDRISI Selva, donde se importaron las imágenes satelitales desde su formato *tiff*, desde la pestaña *File, Import*, en la opción *Government/Data Provider Formats* y finalmente *Geotiff/tiff*. Posteriormente, en la pestaña *Modeling*, en *Environmental/Simulation Models y, Land Change Modeler*, se ingresaron las imágenes para su tratamiento; en primer lugar, la imagen más antigua y en segundo lugar la más reciente, para continuar el geoproceto, se reclasificaron las imágenes con las categorías enlistadas, posteriormente se obtuvieron las gráficas de pérdidas y ganancias, cambios totales y transiciones.

Como resultado de procesar las imágenes en *Land Change Modeler*, se obtuvieron datos en gráficas de barras y los mismos con representación cartográfica. En seguida, en la pestaña de *GIS Analysis, Database Query, Crosstab*, se ingresaron dos imágenes correspondientes a los periodos de análisis, primero la imagen más reciente y en después la antigua, se configuró en *Full cross-tabulation* y, de esta forma se obtuvieron cifras totales del área que ocupa cada categoría en el municipio.

Se trasladaron los datos obtenidos a Excel, para realizar el *Crosstab* (tabulación cruzada), las columnas representan el primer tiempo y las filas el segundo. Se marcaron las cifras de la diagonal principal, mientras que las cifras

fuera de ella son las persistencias entre ambos tiempos de cada categoría. Se obtuvo la suma vertical y horizontal de cada categoría, y se añadió una fila y columna más de ganancias y pérdidas, este dato es el resultado de la diferencia entre el total de la categoría y el dato de la diagonal principal.

La cuarta y última fase del proceso, consistió en proyectar para el año 2030, cifras futuras de la superficie a ocupar de las categorías ya conocidas, la estimación se hizo por medio de tres métodos matemáticos:

1. Aritmético: el método consiste en obtener la diferencia temporal entre la primera y última fecha ($T_2 - T_1$), se obtiene la diferencia entre el año a futuro ($TFut$) y el T_2 ($TFut - T_2$), se restan las superficies de las que se tienen datos ($SupT_2 - SupT_1$); se obtiene K como resultado de dividir la diferencia de superficies entre la primera diferencia temporal obtenida, finalmente K se multiplica por el resultado de restar al tiempo futuro el T_2 . Esto se traduce en la siguiente expresión:

$$\text{Superficie proyectada} = K (TFut - T_2)$$

2. Geométrico: el método inicia con la división de superficies del T_2 y T_1 , posteriormente se obtiene r como resultado elevar el resultado de la división anterior a la potencia 1 entre la diferencia de tiempos ($T_2 - T_1$), el producto se eleva al número de años a los que se proyecta la superficie (30), la fórmula se representa de la siguiente forma:

$$\text{Superficie proyectada} = r^{30}$$

3. Logarítmico: por su nombre, el método inicia con la obtención del logaritmo natural (\ln) de las superficies de T_2 y T_1 , se restan los logaritmos ($\ln T_2 - \ln T_1$) y las temporalidades ($T_2 - T_1$). Posteriormente se dividen los productos de las restas (Diferencia de logaritmos/Diferencia temporal), el resultado se multiplica por los años de proyección y el resultado se expresa con la letra I . Por último, la constante E se eleva a la I , y el resultado es la superficie proyectada. La fórmula se expresa del siguiente modo:

Superficie proyectada = E^I

Resultados y Discusión

Para conocer los cambios de uso de suelo en el municipio más grande del Estado de Tlaxcala, se eligieron siete categorías; a continuación, se describe brevemente cada una de ellas.

1. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura -FAO- (2000) señala que los *bosques* son tierras dotadas de especies arbóreas que rebasan al menos los cinco metros en su madurez y se extienden por más de cinco has. continuas (Montalvo y Gutiérrez, 2017).
2. El *bosque secundario*, fue alterado por la mano del hombre y a partir de reforestaciones se ha regenerado progresivamente.
3. Los *matorrales* según Rzendowski (1978), son la vegetación más abundante en México y dependen de un clima árido o desértico, Tlaxco cuenta con una superficie pequeña de esta especie.
4. La categoría de *Otros tipos*, engloba el pastizal, pradera, tular o algún otro tipo similar, para fines del presente trabajo, no resulta relevante precisar en cada uno de estos elementos.
5. La *agricultura* es la actividad de siembra y cosecha de productos que en su mayoría se destinan a la alimentación, se practica la de temporal o la de riego, por describirlas brevemente, una es dependiente de la precipitación y la última, de un sistema de riego implementado y controlado (Instituto Nacional de Estadística y Geografía -INEGI-, 2009; citado por Santiago, 2009).
6. El *espacio urbano* es el espacio de construcción social, donde se produce una vida colectiva (Harvey, citado por Delgado, 2000:50 y Blasco, 2004), en el municipio se destaca la cabecera municipal por ser el principal espacio de

asentamientos humanos, sin embargo, hay 38 centros de población dispersos en el municipio y se consideran todos en la categoría.

7. El *agua*, hace referencia a los cuerpos de agua del municipio, y aun cuando el de mayor tamaño se encuentra en el municipio de Atlangatepec, Tlaxco como municipio vecino, cuenta con considerables escurrimientos que forman jagüeyes y pequeños embalses.

Cada una de las categorías, de 1990 al año 2000 presentó cambios, es decir, tuvieron pérdidas o ganancias. La mayor cantidad en reducción se puede observar en la tabla 1. La quinta categoría que corresponde a la agricultura perdió en sólo una década poco más de 10,000 hectáreas, lo que representó el 18% de la superficie total del municipio de Tlaxco, pero también fue la categoría con mayor cantidad de ganancias con 8745.56 hectáreas; esto quiere decir que, perdió espacio físico en algunos sitios, pero logró apertura para esta actividad en otros.

Tabla 1. Crosstab de ganancias y pérdidas entre 1990 y 2000

	1	2	3	4	5	6	7	SUMA	PERDIDAS
1	4,713.93	1,823.85	200.88	124.38	116.91	83.70	51.21	7,114.86	2,400.93
2	1,393.56	2,879.46	741.78	674.28	334.44	134.01	61.38	6,218.91	3,339.45
3	370.71	1,083.33	1,571.13	1,070.55	1,657.35	703.71	375.93	6,832.71	5,261.58
4	141.93	659.70	965.16	1,677.24	2,105.28	900.27	427.77	6,877.35	5,200.11
5	123.48	460.35	1,825.65	2,182.59	6,507.99	3,439.71	2,016.00	16,555.77	10,047.78
6	27.27	88.02	628.65	602.73	3,006.81	2,191.59	1,518.48	8,063.55	5,871.96
7	22.77	35.28	286.38	233.46	1,524.78	1,387.44	1,627.74	5,117.85	3,490.11
SUMA	6,793.65	7,029.99	6,219.63	6,565.23	15,253.56	8,840.43	6,078.51	56,781.00	35,611.92
GANANCIAS	2,079.72	4,150.53	4,648.50	4,887.99	8,745.57	6,648.84	4,450.77	35,611.92	

Fuente: construcción propia con base en imágenes satelitales Landsat 1990 y 2000.

Por otro lado, el bosque es la categoría que menor cantidad superficial perdió en esta década de análisis, alrededor de estos años, la población residente en Tlaxco se interesó en gran medida por el bosque de su municipio a partir de que inició una intensa campaña de reforestación que arrancó con las bases que dejó sentadas el Presidente de la República Vicente Fox Quedada a través de reglas de operación en la materia cuyo ejercicio se materializó en el año 2018 con el nuevo mandatario federal Felipe Calderón Hinojosa, quien inaugurara en “El Tejocote” en el municipio

de Tlaxco, el arranque del Programa Nacional Pro Árbol, que tenía una meta de sembrar 280 millones de árboles en ese año.

Por otra parte, al final de las filas y columnas de pérdidas y ganancias respectivamente, se encuentra la suma total de cada una. Resaltan las 35,611.92 hectáreas, sin embargo, no es superficie que haya perdido o ganado el municipio, sino que fueron transiciones para el crecimiento de los centros poblados y por lo tanto un cambio de vocación direccionado a las actividades propias de los procesos de aglomeración urbana.

En la figura 1, se muestran las persistencias que tuvo cada categoría; es decir, la superficie que logró conservar en cantidad, como es el caso de la agricultura, que perdió, pero logró recuperar espacio; por lo tanto, su pérdida real fue de 1,302.21 has. El bosque, perdió 2,400.93, y al mismo tiempo ganó 2,079.72 has., así que el balance, fue de 321.21 hectáreas.

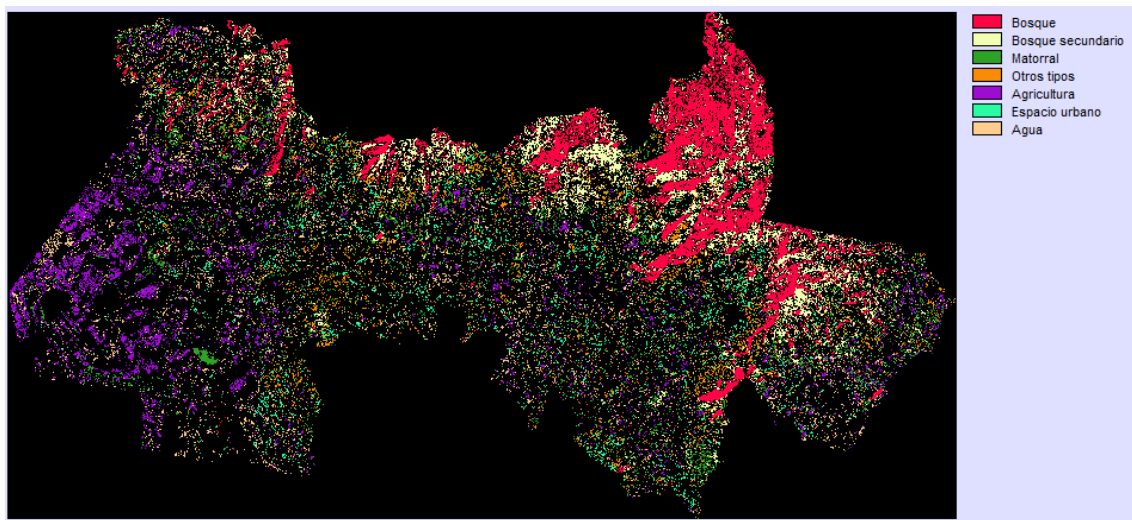


Figura 1.- Persistencia por categoría de 1990 al 2000 (National Aeronautic and Space Administration -NASA- 1990 y 2000).

La forma gráfica de observar las pérdidas y ganancias de superficie de los diferentes usos de suelo, se muestran en la figura 2, a la izquierda las pérdidas y la tonalidad clara representa las ganancias. En un horizonte de investigación detallada y

profunda, se pueden analizar las causas de esas transiciones; sin embargo, advertirlas ya es un paso importante y debe ser materia de análisis para los estudios en cada tema; incluso, aquellos residuales que se concentran en “otros tipos” de usos.

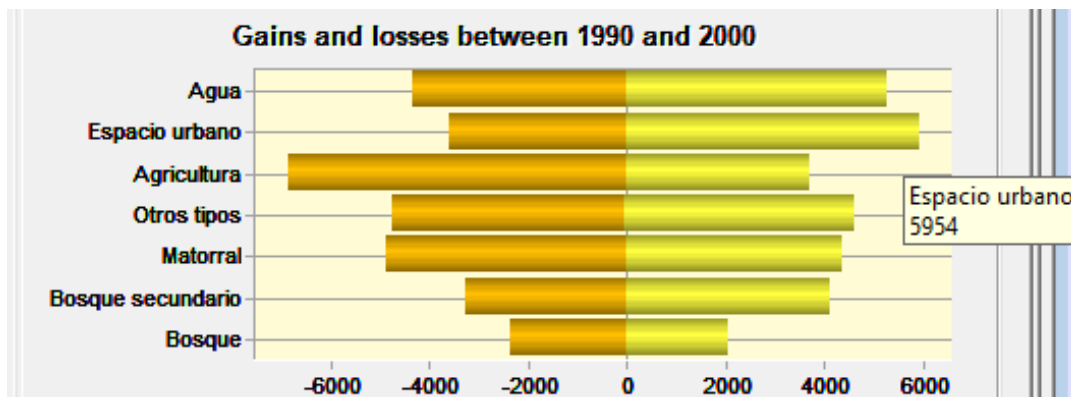


Figura 2.- Pérdidas y ganancias de 1990 al 2000.

El módulo *Land Change Modeler*, permite obtener la figura 3 donde se muestran las categorías que contribuyeron a que otra ganara, en el caso del espacio urbano, fue la agricultura la que mayor superficie aportó al espacio urbano con 1,333 has., en segundo lugar, otros tipos con 458 has., después el matorral con 338, seguido del agua con 181; y, finalmente el bosque con 29 y bosque secundario con 7 hectáreas.

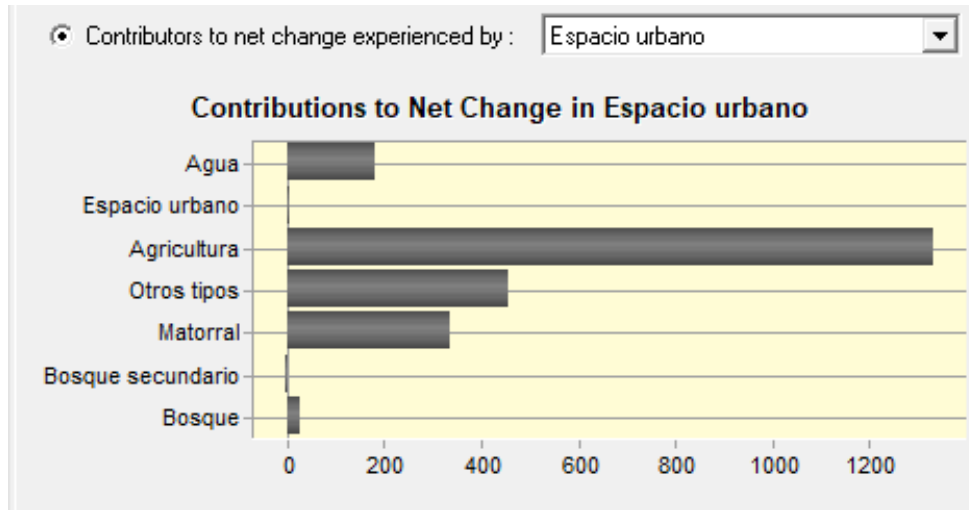


Figura 3.- Contribuciones a un cambio neto en el espacio urbano.

El cambio neto, refleja de mejor manera en qué usos se concentran las transiciones. Si las tendencias se mantienen, es posible definir escenarios de intervención. Un análisis de sitios resulta útil para conocer la exposición al riesgo de cada categoría. Asimismo, en el largo plazo, superficies que tienen altas proporciones pueden llegar a ser alarmantes, tal como se aprecian en la tabla 2, los usos de espacio urbano y bosque secundario; que, comparativamente con los cambios netos, tenían valores significativamente bajos.

Tabla 2. Proyección superficial para el 2030.

Categoría	1990	2000	M. Aritmético	M. Geométrico	M. Logarítmico
			2030		
1. Bosque	7,117.74	6,793.83	5,822.10	5,907.89	5,907.91
2. Bosque secundario	6,228.00	7,030.17	9,436.68	10,111.54	10,111.43
3. Matorral	6,859.98	6,222.87	4,311.54	4,645.09	4,645.13
4. Otros tipos	6,927.12	6,567.21	5,487.48	5,595.84	5,595.87
5. Agricultura	16,752.87	15,269.85	10,820.79	11,563.02	11,563.12
6. Espacio urbano	8,216.01	8,852.58	10,762.29	11,073.80	11,073.72
7. Agua	5,367.51	6,084.90	8,237.07	8,865.34	8,865.24

Fuente: construcción propia con tres métodos de proyección matemática.

En seguida, se presenta el tabulado de aglomeración (ver tabla 3), que explica la expansión física de la ciudad de Tlaxco. Llama la atención el acelerado crecimiento de la mancha urbana en tan poco tiempo. Se centra la atención particularmente en el espacio urbano, porque fue donde hubo más transición del territorio municipal.

Tabla 3. Proceso de aglomeración física de la ciudad 1973-2018

Año	Área urbana (has)	Habitantes	Hab/has	Aglomeración (%)
1973*	14.24	4,969	348.94	-----
1980	47.99	4,911	102.33	337.0
1990	52.73	8,141	154.39	109.9
2000	123.10	11,571	93.99	233.4
2010	352.26	14,806	42.03	286.2
2017	753.31	-----	-----	213.9
Acumulado				1280.3
* El año de la primera escena de imagen de satélite registrada en el servidor ARIA Landsat, estructura matricial de 57 centímetros en tamaño de píxel.				

Fuente: construcción propia con imágenes satelitales del servidor *Advanced Rapid Imaging and Analysis* (ARIA) multitemporales y Censos de población del INEGI 1970 – 2010.

El crecimiento físico de la ciudad de Tlaxco desde 1973 hasta el 2017 (ver figura 4), ha sido de 12 veces el tamaño original, pero, entre el 2000 y 2010, fue donde mayor expansión y aglomeración se presentó, esto es explicado desde diversas teorías que pueden ayudar a comprender el proceso de aglomeración. Mientras tanto, la política territorial en México encabezada por instituciones como la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU) y la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI), promueven un modelo de ciudad compacta; no obstante, la realidad en la mayoría de las ciudades en México se explica de mejor manera por

la idea de ciudad difusa. Hay otros modelos de ciudad que explican históricamente este proceso como alternativa el desarrollo urbano, entre ellas tenemos: ciudad compacta, ciudad vertical, ciudad difusa, ciudad amurallada, ciudad jardín, entre otros. Una de las variables que determinan la estructura física de las ciudades es la morfología urbana que tiene los siguientes elementos: la forma de la trama urbana, la tipología edificatoria y los usos de suelo; que para el caso de la cabecera municipal de Tlaxco, al igual que otros modelos como por ejemplo el del plato roto, se derivan de la reconfiguración de las ciudades.

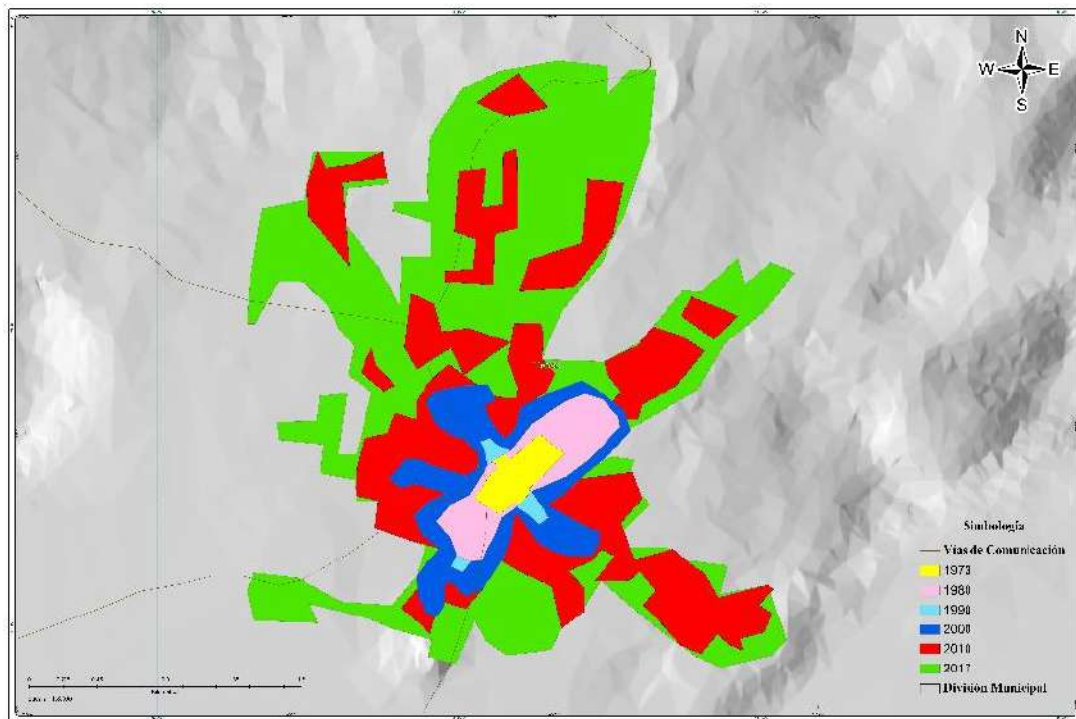


Figura 4.- Aglomeración urbana en Tlaxco 1973-2017.

El crecimiento de la mancha urbana debe responder a lineamientos basados en los principios del ordenamiento territorial, sin embargo, como menciona Montalvo (2010), este crecimiento ordenado de los centros de población no establece elementos mínimos que articulen propuestas coherentes para que una región incorpore la planificación de cobertura de los servicios públicos municipales.

El referido espacio urbano en proceso de expansión no debe verse únicamente como generador de recursos económicos, sino como una construcción colectiva donde resalta la importancia de protección y conservación del medio ambiente como factor endógeno (Gutiérrez, 2011) ya que, de su cuidado, dependerá en buena medida la salud de los habitantes que tienen cercanía o dependen de los recursos que ofrecen los diferentes usos de suelo disponibles como vocación y genética territorial.

Finalmente, llama la atención que elementos como el agua presentan un comportamiento que debe analizarse con mucho cuidado, porque dependerá de la época del año en que se tome la escena de imagen de satélite. Sin embargo, para efectos del presente trabajo, al igual que el espacio urbano y el bosque secundario, están ganando terreno y puede deberse a la creación de presas, represas y jagüeyes por un lado; pero para el bosque secundario, resultado de la disminución de la masa primaria de bosque. Las demás categorías tienen una tendencia a una disminución, especialmente la agricultura, a raíz de todos los problemas estructurales del campo mexicano.

Conclusiones

El proceso de urbanización se construye conforme la población encuentra las condiciones para hacerlo, pueden ser económicas o turísticas, ambas se relacionan con los efectos que desencadenó la política de fomento turístico primero en el Estado de Tlaxcala hacia finales de los noventa, con el impulso del sector por el Gobernador en turno Alfonso Abraham Sánchez Anaya. Esa tendencia de apoyo al turismo continuó los programas que promovió la Secretaría de Turismo del Gobierno Federal, hasta concretase toda una corriente de promoción de Tlaxco, cuando fue nombrado *Pueblo Mágico*, estos eventos, han sido factores determinantes para un incremento del comercio, turismo y nuevos residentes; y, en consecuencia, servicios

complementarios vinculados a la necesidad de vivienda, la dotación de infraestructura, equipamiento, servicios públicos y transporte. Todo lo anterior, generó expectativas en todos los sectores, la dinámica del suelo empezó a detonarse en todos sentidos: especulación, compra venta de terrenos, apertura de comercios, unidades habitacionales, crecimiento de colonias de manera exponencial, entre otros.

En este trabajo se considera al crecimiento poblacional como eje principal de los cambios proyectados; ya que, a mayor cantidad de espacio urbano, menor cobertura de bosque primario; sin embargo, resulta contradictorio, que se pueda fortalecer el bosque secundario con la finalidad de tratar de recuperar el espacio que ya ha sido aprovechado.

Lo anterior obedece a la aparición de nuevas colonias en la cabecera municipal, así como nuevos asentamientos próximos a la ciudad, donde se establecieron en forma de ramales en diferentes direcciones, por ejemplo, la colonia El Sabinal se estableció en el norte, la Vista Hermosa al oriente, ambas ahora tienen actividades forestales, por otro lado, la colonia Tepatlaxco se fue hacia el poniente y San Juan al surponiente, ambas todavía con desempeño actividad agrícola.

El proceso de aglomeración que sufrió la ciudad de Tlaxco en las últimas dos décadas se ha incrementado en más de tres veces su tamaño, eso explica las pérdidas que ha sufrido el suelo periférico de la ciudad, lo que seguramente modificará el paisaje natural y los espacios de transición buscarán un reacomodo. En consecuencia, habrá una dinámica de uso diferente, de carácter anárquico si no se contemplan instrumentos y estrategias de planificación, ordenación y gestión urbana del suelo en el municipio.

Referencias bibliográficas

Blasco, J. (2004). Espacio urbano y espacio creativo. Texto de diálogos sostenidos en el Forum Universal de las Culturas. Consejo Nacional de la Cultura de Venezuela. Barcelona. [En línea]. Disponible en: <http://docplayer.es/69222820-Espacio-urbano-y-espacio-creativo.html>.

Bocco, G., Mendoza, M. & Masera O. (2001). “La dinámica del cambio de uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación”, *Investigaciones Geográficas* (pp. 18-38), Boletín, núm. 44, Instituto de Geografía, UNAM, México.

Braimoh, A. K. (2006). “Random and systematic land-cover transitions in northern Ghana”. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 113. (pp. 254-263). [En línea]. Disponible en: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201301107340>

Cotler, H., Sotelo, E., Domínguez, J., Zorrilla, M., Cortina, S. & Quiñones, L. (2007). La conservación de suelos: un asunto de interés público en *Gaceta Ecológica* (pp. 5 – 71), núm. 83, abril-junio, 2007, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Distrito Federal, México.

Delgado, M. (2000). *Espacio, Territorio y Ambiente* (pp. 33-176). Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geografía, Bogotá. Colombia.

FAO (2000). *On definitions of forest and forest change. Forest Department. Papper* 33. Rome, Italy. [En línea]. Disponible en: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2001397265>

Guevara, R. M. L. & Montalvo, V. R. (2014). Cambio de uso de suelo y vegetación derivados de la dotación de infraestructura: Sierra Norte del Estado de Puebla en *Nova Scientia* (pp. 314-336), vol. 7, Núm. 13, 2014, Universidad De La Salle Bajío

León, Guanajuato, México. [En línea]. Disponible en:

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=203332667017>

Gutiérrez, D. A. (2011). Ciudades posibles, en AUS (pp. 34-37), Universidad Austral de Chile, Núm, 10, Valdivia, Chile.

INEGI (2009). *Guía para la interpretación de cartografía uso del suelo y vegetación: Escala 1:250 000. Serie III. México.*

Labasse, J. (1973). La organización del espacio. Elementos de geografía aplicada. Madrid: Instituto de Estudios de Administración Local, 752 Pp.

Lefebvre, H. (1974). La producción del espacio, Ed. Capitán Swing, España, 453 Pp.

Montalvo, V. R., Ramiro, C. J. J. & Gutiérrez, C. M. M. (2017). Geografía del suelo en Tlaxcala, usos y distribución temática. El Colegio de Tlaxcala A. C. México. 76 Pp.

Montalvo, V. R. (2010). En busca del crecimiento ordenado de los centros de población en el estado de Tlaxcala. FOMIX-CONACyT-Gobierno del Estado de Hidalgo, El Colegio de Tlaxcala A. C., México. 210 Pp.

Pereira, C. A., Adame, M. S., Rosete, V. F. & Alvarado, G. A. (2018). Construcción metodológica de un modelo de ordenamiento territorial para américa latina en: Ra Ximhai (Pp. 111-131), Vol. 14 Núm. 1. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/461/46158062007/46158062007.pdf>

Pérez, S. H., Benítez, R. E. & Díaz, R. M. (2017). Sistema georreferenciado con drones en: Ra Ximhai (Pp. 65–77), Vol. 13 Núm. 3. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46154070004>

Pointius, R. G., Shusas, E. & McEachern, M. (2004). *Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. Agriculture, Ecosystems & Environment* 101 (2-3) En ELSEVIER (Pp. 251-268). [En línea]. Disponible en: https://www2.clarku.edu/~rpontius/pontius_et al_2004_aee.pdf

Richters, J. E. (1995). Manejo del uso de la tierra en América Central hacia el aprovechamiento sostenible del recurso tierra. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), San José Costa Rica. 415 Pp. [En línea]. Disponible en: Instituto Interamericano. <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A8748e/A8748e.pdf>

Rosete, V. F (2008). Modelo predictivo de cambio de uso de suelo en la Península de Baja California. México. Instituto de Geografía. UNAM. Pp. 153.

Rzendowski, J. (1978). 1ª Edición digital. Comisión Nacional para el conocimiento y uso de biodiversidad. CONABIO, Vegetación. México. Pp. 432.

Santos, M. (2000). La naturaleza del espacio. Técnica y tiempo, razón y emoción, editorial Ariel, España. Pp. 345.

Souto, P. (2011). Territorio, Lugar, Paisaje. Prácticas y conceptos básicos en geografía, Editorial Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad de Buenos Aires. Argentina. Pp. 288.

Síntesis y Aplicaciones Biomédicas de Compósitos en Estado Hidrogel Empleando como Relleno Estructuras Organometálicas (MOFs)

Synthesis and Biomedical Applications of Composites in Hydrogel
State Using Metal-Organic Frameworks (MOFs) as a Filler

Tirso E. Flores-Guia^a, Nallely Escobedo-Estrada^a, Carlos A. González-Carbajal^a,
Jesús A. Claudio-Rizo^a, Nayeli Rodríguez-Fuentes^b, Denis A. Cabrera-Munguia^{a,*}

^a Depto. Materiales Avanzados, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad
Autónoma de Coahuila, Boulevard Venustiano Carranza e Ing. José Cárdenas
Valdés s/n, República, Saltillo 25280, Coahuila, México.

^b CONACYT-Centro de Investigación Científica de Yucatán, Calle 43 No. 130 por
32 y 34, Chuburna de Hidalgo, Mérida 97205, Yucatán, México

Correspondencia para autor: Denis Aidee Cabrera Munguia

Universidad Autónoma de Coahuila

*Email: dcabrera@uadec.edu.mx

RESUMEN

Los hidrogeles poseen una estructura tridimensional de cadenas poliméricas compuestas de grupos terminales hidrofílicos capaces de retener una gran cantidad de agua, lo que los hace mecánicamente inestables. Una manera de mejorar sus propiedades mecánicas es el uso de rellenos inorgánicos, dentro de este tipo de rellenos se tiene a las estructuras organometálicas (MOFs) que son polímeros de coordinación compuestos de iones metálicos y ligandos orgánicos, con una alta estabilidad térmica, gran área superficial y propiedades bactericidas debido a la presencia de iones metálicos. Estas características pueden combinarse con las de los hidrogeles al sintetizar sus compósitos para modular propiedades como resistencia mecánica, capacidad antimicrobiana, velocidad de degradación, capacidad de adsorción de fármacos y la modulación del metabolismo celular presente en la curación de tejido; atributos indispensables para sus aplicaciones biomédicas. Por lo que en esta revisión bibliográfica se discutirán ampliamente las propiedades de los MOFs, la síntesis y aplicaciones biomédicas de sus compósitos en estado hidrogel.

Palabras clave: Compósitos, hidrogel, MOFs, aplicaciones biomédicas

ABSTRACT

Hydrogels have a three-dimensional structure of polymer chains composed of hydrophilic end groups capable of retaining a large amount of water, which makes them mechanically unstable. A way to enhance their mechanical properties is the use of inorganic fillers, among these fillers, the metal-organic frameworks (MOFs) that are coordination polymers composed of metal ions and organic ligands, with high thermal stability, high surface area, and bactericidal properties related to the presence of metal ions. These characteristics can be combined with that of hydrogels when their composites are synthesized, to modulate various properties such as mechanical resistance, antimicrobial capacity, degradation rate, drug

adsorption capacity, and the modulation of cellular metabolism of the tissue healing process, which are attributes necessary for biomedical applications. The MOFs properties, synthesis, and biomedical applications of these composites in hydrogel state will be widely discussed in this review.

Keywords: Composites, hydrogels, MOFs, biomedical applications

INTRODUCCION

Diferentes biopolímeros y polímeros sintéticos han sido usados para el diseño de hidrogeles por metodologías de polimerización que involucran fenómenos de entrecruzamiento físico, químico o ambos (Akhtar y col., 2016). Sin embargo, existe el reto constante de mejorar sus propiedades mecánicas, velocidad de degradación y biocompatibilidad; así como también, la generación de sistemas de hidrogeles con comportamiento biológico adaptado. Estos últimos por lo general son compósitos que involucran mezclas de polímeros/biopolímeros que forman una matriz híbrida 3D hidratada con agentes orgánicos/inorgánicos dispersos dentro de ella (Claudio-Rizo y col., 2016b). En este respecto, el empleo de las estructuras organometálicas (MOFs) como agente de relleno de hidrogeles representa una estrategia innovadora para la mejora de las propiedades químicas, físicas y biológicas de los hidrogeles. Los MOFs son polímeros de coordinación compuestos de centros metálicos coordinados a ligandos orgánicos. Esta composición química puede ser aprovechada ya que los cationes metálicos (Ca^{+2} , Zn^{+2} , Mg^{+2} , Mo^{+6} , Sr^{+2} , Se^{+6}) actúan como cofactores de proteínas para regularizar el proceso de curación de tejido y son capaces de inhibir el crecimiento bacteriano (Lemire y col., 2013). Además, se pueden emplear en su síntesis ligandos orgánicos con baja citotoxicidad tales como el ácido tereftálico, cinámico o trimésico; o incluso proteínas y aminoácidos. Dichos ligandos representan importantes sitios para el control de la señalización celular relacionada con la ingeniería de tejido y los biosensores

(McKinlay y col., 2010; Barbosa y col., 2020). Aunado a ello, la estructura microporosa y alta área superficial de los MOFs pueden ser aprovechadas para la adsorción de fármacos (Chen y col., 2021; Claudio-Rizo y col., 2020a). Con esto en mente, la presente revisión contempla el panorama actual de hidrogeles acoplados con MOFs que han sido diseñados y aplicados como biosensores, como sistemas empleados en la liberación de fármacos, materiales antimicrobianos y regeneración de tejido óseo y piel.

HIDROGELES

Un hidrogel es una red macromolecular constituida por redes entrecruzadas de cadenas poliméricas, cuya principal característica es su capacidad de absorber grandes cantidades de agua sin perder su estructura física. La capacidad de absorber fluidos radica en los grupos hidrofílicos funcionales ($-\text{OH}$, COO^- , $-\text{NHCOO}^-$) que lo constituyen y que sirven de unión para la estructura polimérica (Maitra y Shukla, 2014). En estado seco el gel es un material sólido y duro, pero al entrar en contacto con una solución acuosa, el agua se difunde hacia el interior y el gel tiende a hincharse hasta alcanzar un equilibrio fisicoquímico (Ramirez y Astudillo, 2016). Esta hinchazón, debida al ingreso de líquido en la matriz polimérica permite la difusión de moléculas de soluto dentro y fuera de la estructura (Singh y col., 2010). Los hidrogeles pueden clasificarse debido a su naturaleza, composición polimérica, configuración, tipo de entrecruzante, apariencia física y la carga eléctrica de la red (Nayak y Das, 2018).

Basándose en el tipo de entrecruzamiento se pueden dividir en hidrogeles físicos y químicos; siendo los hidrogeles físicos aquellos que tienen uniones transitorias que surgen de interacciones físicas (interacción iónica, puente de hidrógeno o interacciones hidrofóbicas), mientras que los hidrogeles químicos cuentan con uniones permanentes (enlaces covalentes, oxidación o hidrolisis, polimerizaciones) como puede observarse en la **Figura 1** (Maitra y Shukla, 2014).

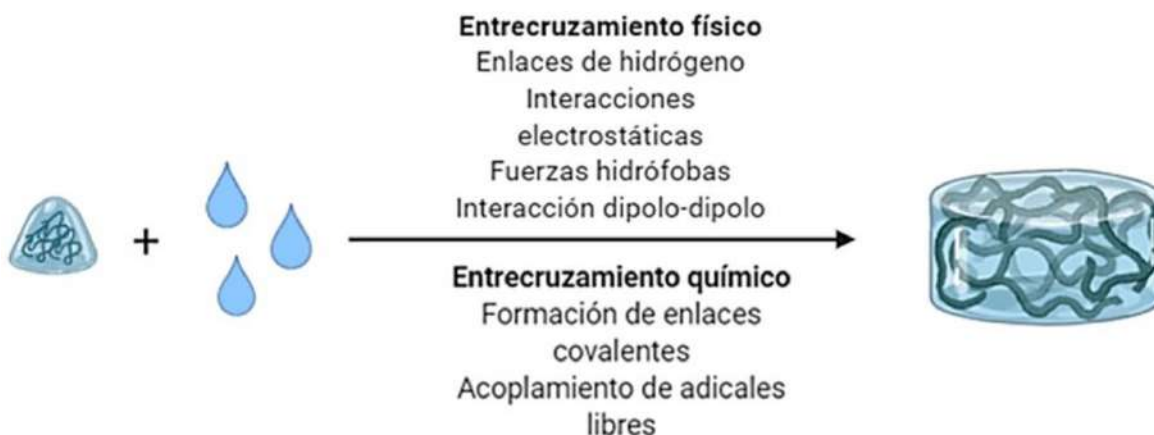


Figura 1. Tipos de enlaces en hidrogeles físicos y químicos.

Por otro lado los hidrogeles presentan características como hinchamiento, absorción de solutos de interés, porosidad, apariencia suave y fotoestabilidad (Batool y col., 2020; Thakur y col., 2018). Siendo materiales excelentes para áreas que van desde la agricultura hasta la medicina. Sin embargo, para que un hidrogel tenga aplicación en el área de la salud como lo es la ingeniería de tejidos, debe cumplir con características como nula toxicidad, migración celular, biodegradabilidad, biocompatibilidad y baja respuesta inflamatoria (Tabata, 2009), las cuales pueden regularse de acuerdo a la materia prima empleada.

Por lo que existen hidrogeles a base de polímeros sintéticos o naturales. Entre los materiales sintéticos empleados para la elaboración de hidrogeles está el óxido de polietileno (PEO), alcohol poli-vinílico (PVA), ácido poli-acrílico (PAA) y algunos péptidos. Por su parte, entre los polímeros naturales más comúnmente empleados se encuentran la agarosa, alginato, quitosano, colágeno, gelatina, y ácido hialurónico (Vedadghavami y col., 2017). Si bien los hidrogeles sintéticos son utilizados en ingeniería de tejido debido a sus propiedades y composición química controlable y reproducible, los hidrogeles naturales tienen la ventaja de contar con propiedades similares a la matriz extracelular natural (**Tabla 1**). No obstante, se

presenta dificultad en controlar las propiedades mecánicas y la respuesta a estímulos de los hidrogeles naturales. Por lo que se han desarrollado hidrogeles híbridos entrecruzando por ejemplo, polímeros sintéticos y macromoléculas biológicas, interconectadas covalentemente o no covalentemente (Kopeček, 2007).

Tabla 1. Hidrogeles utilizados en ingeniería de tejido.

Polímero	Ventaja ofrecida	Referencia
Poli(alcohol vinílico) PVA	Acelera la formación de tejido granular debido a que favorece una alta deposición de colágeno.	(Bourke y col., 2003)
Poli(óxido de etileno) PEO	Regula la proliferación de fibroblastos, incrementando la deposición de colágeno y evitando la formación de cicatriz.	(Zhu, 2010)
Poli(ácido acrílico) PAA	Controla la acción de metaloproteinasas promoviendo la sanación de la herida.	(Tsou y col., 2005)
Alginato	Tiene una alta biocompatibilidad, baja toxicidad y buenas propiedades adhesivas y tiene la capacidad eficiente de absorber los exudados de la herida	(Han y col., 2010)
Quitosano	Estimula la proliferación de fibroblastos, angiogénesis, síntesis y deposición regular de	(Kopeček, 2007)

	fibras de colágeno que conducen a mejorar la organización de tejido	
Colágeno	Acelera la proliferación de fibroblastos y angiogénesis acelerando la formación de nuevo tejido dérmico	(Coradin y col., 2002)

Las técnicas de entrecruzamiento para la síntesis de hidrogeles se dividen en físico (enlaces de hidrogeno, injerto anfifílico, interacciones iónicas, interacción con proteínas y por cristalización) y químicos (grupos químicos complementarios, alta energía de radiación, polimerización por radicales libres y por medio de enzimas). Dentro de los entrecruzantes químicos comúnmente empleados se encuentran las dispersiones de uretano, acrilato, etilenglicol, glutaraldehído, ácido cítrico, carbodiimidias y genipina (Akhtar y col., 2016; Hu y col., 2019). Se ha observado que los hidrogeles que contemplan entrecruzamiento químico si presentan tanto mejora de sus propiedades mecánicas como de su degradación debido a la existencia de enlaces covalentes de reticulación intermoleculares, limitando la actividad proteolítica que tiende a degradar la matriz en estado 3D tejido (Akhtar y col., 2016; Claudio-Rizo y col., 2016a; Maitra y Shukla, 2014). El control de la relación propiedades mecánicas/degradación debe ser logrado en los bio-hidrogeles con la finalidad de evitar la formación de tejidos con deformaciones y/o cicatrices, así como también que la vida útil del hidrogel sea la adecuada durante el proceso de curación de tejido (Ding y col., 2020; Opt Veld y col., 2020).

ESTRUCTURAS ORGANOMETÁLICAS (MOFs)

Una estructura metal-orgánica es un polímero de coordinación compuesto de iones metálicos unidos a moléculas orgánicas (ligando) mediante enlaces de

coordinación. Los bloques estructurales de los MOFs se unen además mediante enlaces por puente de hidrógeno, interacciones electrostáticas e interacciones π - π (Wyszogrodzka y col., 2016). Obteniéndose un compuesto con enlaces de coordinación en 1, 2 o 3 dimensiones y una estructura con espacios vacíos, generando materiales de naturaleza microporosa y mesoporosa con alta área superficial ($\sim 1000 \text{ m}^2/\text{g}$ o superior) y una alta estabilidad térmica. Estos materiales han sido empleados exitosamente en la separación y almacenamiento de gases, catálisis, sensores, magnetismo y energía, y en los últimos 15 años en aplicaciones biomédicas como sensores biológicos, óptica molecular, liberación de fármacos e ingeniería de tejido (Zhang y col., 2019). Los métodos de síntesis más comúnmente empleados incluyen el método hidro/solvotérmico; síntesis asistida por ultrasonido o microondas, síntesis mecanoquímica y electroquímica (Li y col., 2020; Safaei y col., 2019).

Por otro lado, la presencia inherente de agua en la estructura del hidrogel hace necesario que los MOFs que interaccionen con ellos sean estables químicamente al agua. De acuerdo a la estructura química de los MOFs, sus puntos químicamente débiles son los enlaces de coordinación entre sus iones metálicos y el ligando orgánicos, que pueden romperse mediante hidrólisis obteniéndose el ligando protonado y el respectivo hidróxido metálico (Howarth y col., 2016).

Algunos de los factores que pueden mejorar la estabilidad de los MOFs (**Figura 2**) son un enlace fuerte entre el ión metálico y el oxígeno (Fe-O>Cr-O>Cu-O>ZnO), un alto pKa del ligando (pirazol>imidazol>dicarboxilato>carboxilato), un alto número de coordinación como el obtenido en una geometría octaédrica; así como un centro metálico con un alto estado de oxidación (Zr^{+4} , Ce^{+4}) (Lee y col., 2018). Los MOF estables en agua pueden clasificarse en: i) Estructuras metal-carboxilatos con iones metálicos de valencia alta, ii) Estructuras metal-azolatos que contienen ligandos con átomo de nitrógeno como donador y iii) MOF funcionalizados con superficies porosas hidrofóbicas (Li y col., 2020).

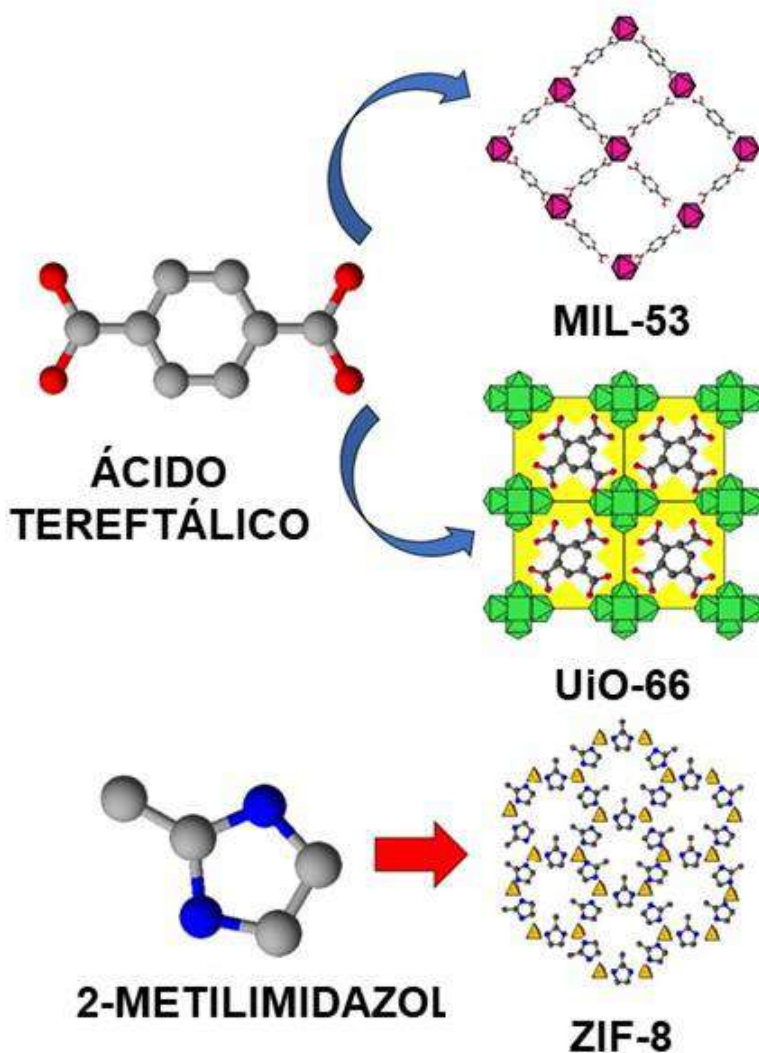


Figura 2. Estructuras organometálicas estables en agua.

Las estructuras metal-carboxilatos de acuerdo con el principio de ácidos y bases duros y suaves, involucran la coordinación de ligandos que contienen grupos carboxílicos y metales ácidos duros como Cr^{+3} , Al^{+3} , Fe^{+3} y Zr^{+4} . Estos tipos de MOFs incluyen a las series MIL y UiO (Bhardwaj y col., 2018; Feng y col., 2018; Li y col., 2020). En el caso de las estructuras metal-azolatos (imidazolatos, pirazolatos, triazolatos y tetraazolatos) se usan iones metálicos ácidos suaves como Zn^{+2} , Cu^{+2} , Ni^{+2} , Mn^{+2} y Ag^{+} , dentro de este tipo de MOF se tiene a la categoría de los ZIF que

consisten en MOFs a base de Zn^{+2} y el ligando imidazol (Bhardwaj y col., 2018; Feng y col., 2018; Li y col., 2020).

Sin embargo, ninguna de estas estructuras estables a la descomposición en agua, han mostrado resistencia a la descomposición en presencia de iones de coordinación fuertes como los aniones fosfato (PO_4^{-3}). De hecho, una forma de obtener MOFs estables en soluciones altamente ácidas o básicas es mediante el reemplazo de los ligandos orgánicos que contienen grupos carboxílicos por ligandos fosfonatos. No obstante, esta sustitución ocasiona la obtención de polímeros de coordinación amorfos o materiales no porosos (Howarth y col., 2016).

Por otro lado, el solvente empleado en la síntesis del MOF y su composición química (metal y ligando) son factores que influyen su biocompatibilidad. Por lo que para evitar la toxicidad del MOF se recomienda que en su síntesis se utilice sólo agua o cierta proporción de etanol como solvente. Entre los iones metálicos biocompatibles se tiene el Fe^{+2} , Fe^{+3} , Ca^{+2} , Zn^{+2} y Mg^{+2} ; además de iones metálicos esenciales como $Se^{+4, +6}$, $Cu^{+,+2}$, Mn^{+2} , Mo^{+6} , Cr^{+3} y V^{+3} . Así también, iones metálicos inertes como el Au^{+} , Ag^{+} y Zr^{+4} que pueden utilizarse para aplicaciones biomédicas (Horcajada y col., 2010).

Respecto al ligando orgánicos, moléculas de gran polaridad con grupos imidazolatos y grupos carboxílicos pueden ser eliminados del organismo por procesos de excreción (Pandey y col., 2020). Además, los ácidos carboxílicos y sus sales se encuentran naturalmente en el organismo participando en los procesos bioquímicos de la célula como la respiración en el ciclo de Krebs. De esta forma la degradación de MOFs luego de 7 días a $37^{\circ}C$ de la familia MIL (MIL-53, MIL-88, MIL-100, MIL-101), da lugar a la formación de productos de desecho como el ácido fumárico, ácido tereftálico y ácido trimésico, los cuales son considerados de nula o baja toxicidad (Barbosa y col., 2020). Una alternativa a este inconveniente es la síntesis de bioMOFs que utilizan como ligando moléculas bioactivas que incluyen aminoácidos, péptidos, proteínas, bases nucleicas, ácidos carboxílicos, ácidos

fosfónicos o ingredientes farmacéuticos activos como moléculas con poder antibiótico, anti-inflamatorio y hasta antioxidante (Barbosa y col., 2020).

Por otro lado, la actividad antimicrobiana de los MOFs ha sido generalmente atribuida al lixiviado de los iones metálicos (Cu^{+2} , Ca^{+2} , $\text{Fe}^{+2,+3}$, Zn^{+2} y Ag^{+}) que lo componen debido a su capacidad de unirse a la pared celular microbiana e inhibir enzimas (**Figura 3**), causando su ruptura (Bhardwaj y col., 2018). Otra posible hipótesis, es que su poder biocida se debe al gran espacio interior de su estructura química, haciendo posible que cause daño y destruya la pared celular microbiana (Wyszogrodzka y col., 2016).

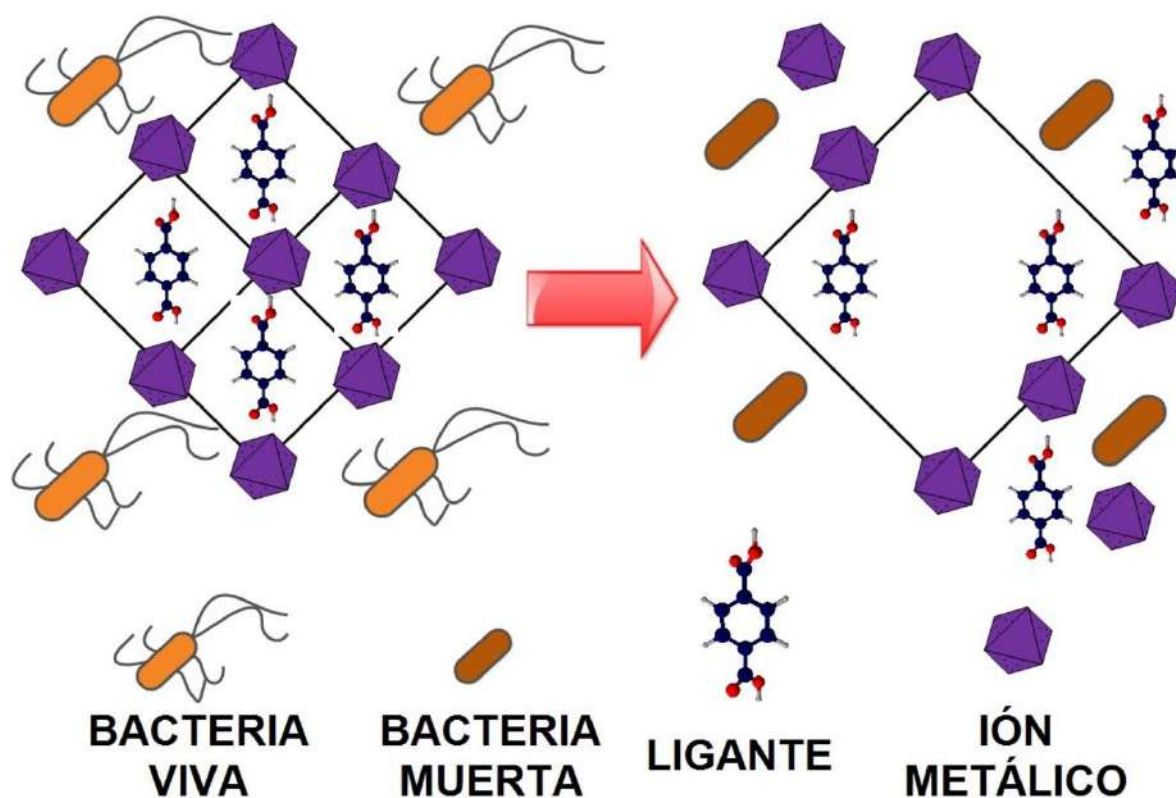


Figura 3. Actividad antimicrobiana de MOFs.

La química intrínseca de los metales está involucrada con el tipo de daño que pueden ocasionar a la pared microbiana. Así la toxicidad de los metales depende

de su habilidad para actuar como ácidos de Lewis (donador de pares electrónicos) con proteínas con roles específicos, también se debe a su capacidad para participar en reacciones de óxido-reducción, este tipo de metales actúan como cofactores de enzimas involucradas en diferentes procesos biológicos vitales como la respiración. Finalmente, la especiación del metal, es decir, las diversas formas (cationes u oxianiones) y estados de oxidación en las que pueden estar presente, afecta su reactividad, toxicidad y solubilidad (Lemire y col., 2013).

Se ha reportado que los MOFs basados en Ag^+ y Cu^{+2} han presentado actividad antimicrobiana contra grupos de bacterias como *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* y *Pseudomona aeroginosa* (Bhardwaj y col., 2018). La actividad biocida de la plata se ha atribuido a que los iones Ag^+ interactúan con los grupos tioles de las proteínas de la bacteria, afectando la replicación de su Ácido DesoxiRibonucleico (ADN) lo que inhibe su crecimiento celular (Karimi Alavijeh y col., 2018). El zinc es otro metal empleado con propiedades bactericidas, existente en trazas en el organismo e involucrado en los procesos de curación de heridas y con propiedades anti-inflamatorias. Así, el MOF ZIF-8 a base de Zn ha sido empleado en reparación de hueso y ha presentado actividad antimicrobiana contra *Staphylococcus epidermis* y *Staphylococcus aureus*; este MOF es muy activo en un pH ácido de 6, mientras que a un pH=7 o superior no presenta actividad biocida. Finalmente, el cobalto ha presentado también actividad antimicrobiana ya que los sitios activos del cobalto tienen la capacidad de epoxidar los lípidos de la pared celular microbiana y con ello causa la ruptura de la membrana celular (Karimi Alavijeh y col., 2018).

El uso de MOFs en aplicaciones biomédicas se ha restringido como vehículos para liberación controlada de fármacos, enzimas o proteínas; como sensores en bioimagen para el seguimiento en tiempo real de materiales empleados como vehículos para liberación controlada de fármacos en el organismo y como sensores biológicos de oxígeno, glucosa o biomoléculas de interés (Banerjee y col., 2020; Keskin y Kizilel, 2011; McKinlay y col., 2010).

HIDROGELES REFORZADOS CON MOFS PARA APLICACIONES BIOMÉDICAS

Una de las principales limitantes de la aplicación de los hidrogeles en el área biomédica son sus propiedades mecánicas en aplicaciones que requieren carga y su fácil manejo. Por lo que, es necesario reforzar la red hidrofílica para mejorar sus propiedades mecánicas mediante micro y nano “fillers”. Estos “fillers” o rellenos pueden consistir en moléculas orgánicas o partículas inorgánicas, las cuales, además de mejorar las propiedades mecánicas también pueden aportar nuevas funcionalidades al hidrogel (Liu y col., 2019). Aunado a esto, la incorporación de este tipo de materiales a la red del hidrogel mejora significativamente su estabilidad estructural debido a las múltiples interacciones (puente de hidrógeno, interacciones de van der Waals e interacciones electrostáticas) entre la superficie polar de los “fillers” y los grupos hidrofílicos de la matriz polimérica. Por ello, la incorporación de partículas con superficies polarizadas es una búsqueda constante en este tipo de materiales.

Algunos ejemplos de estos materiales compuestos consisten en reforzar la matriz polimérica del hidrogel con gelatina (Rodríguez-Rodríguez y col., 2020), quitosano (Huang y col., 2005), colágeno (Tylingo y col., 2016), alcohol poli-vinílico (Bonakdar y col., 2010) y redes interpenetradas de poliuretano (Claudio-Rizo y col., 2020b), entre otros. En el caso de la incorporación de partículas inorgánicas se encuentra principalmente el uso de hidroxiapatita (Peter y col., 2010b), biovidrios (Peter y col., 2010a), partículas cerámica como wollastonita y SiO₂ (Wu y Sailor, 2009; Yu y col., 2018), óxidos metálicos de zinc, titanio y cobre (Wahid y col., 2017); y materiales a base de carbono (Ege y col., 2017).

Un buen candidato para usarse como “filler” de hidrogeles son las estructuras organometálicas conocidas como MOF. Su principal ventaja es la superficie altamente polarizada que le otorgan los grupos carboxílicos o imidazol, además, al estar formados por centros metálicos (cationes), estos pueden actuar como

aglutinantes en polímeros hidrofílicos en hidrogeles (Liu y col., 2019). La **Figura 4**, esquematiza la forma en que la red tridimensional puede ser utilizada para la dispersión del MOF en la matriz del hidrogel. Con esto se resuelven dos problemáticas: la primera es que se disminuye la tendencia del MOF a descomponerse en medios hidrofílicos (Howarth y col., 2016), la segunda es que al interactuar con los componentes del hidrogel se incrementa su resistencia mecánica debido a la rigidez estructural del MOF mejorando su estabilidad y haciéndolos sumamente atractivos para aplicaciones biológicas, las cuales generalmente requieren materiales con alta porosidad, buena retención de agua y citocompatibilidad (Howarth y col., 2016).

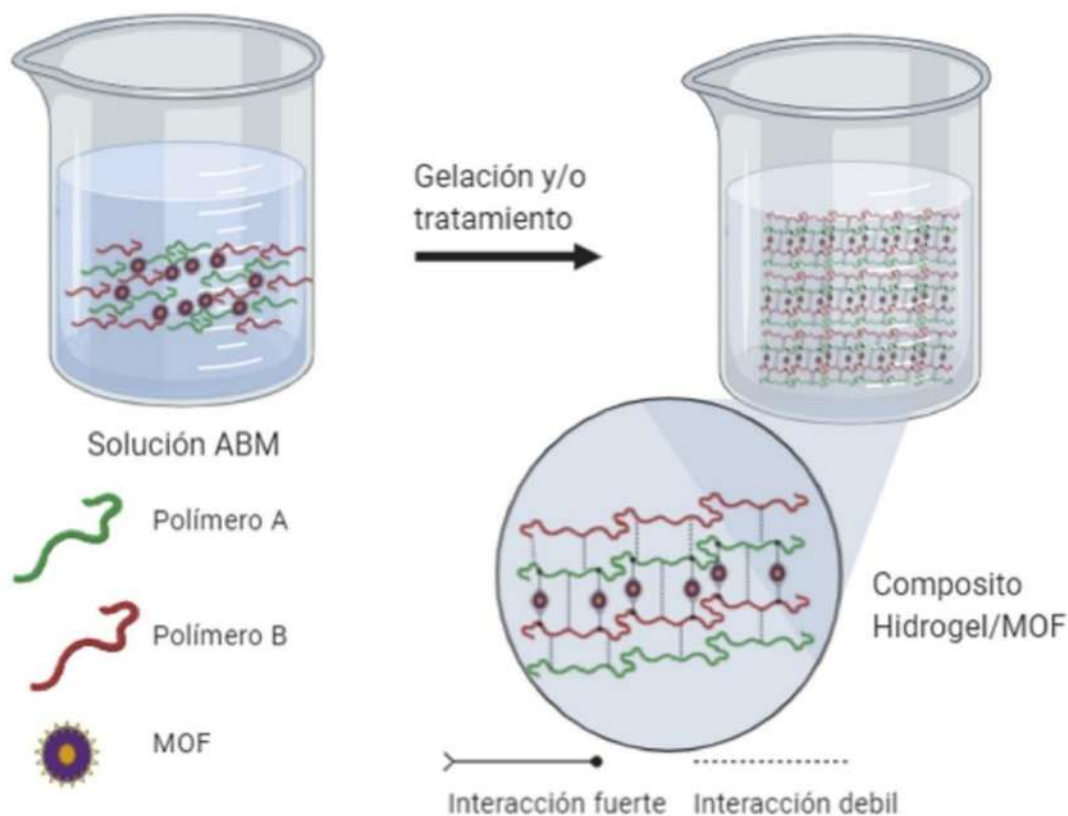


Figura 4. Esquema general para la obtención de materiales compuestos hidrogel/MOF.

De acuerdo con Wang y col. (2019) la obtención de materiales compuestos de MOF-hidrogeles puede resumirse en dos rutas: (a) el método de mezclado directo y (b) síntesis in situ del MOF. En el primer caso, antes de que el hidrogel empiece a gelificar se adicionan los cristales del MOF, de esta manera, puede considerarse al MOF como la fase dispersa, mientras que el líquido precursor o sol, es la fase continua. La formación de la estructura 3D del hidrogel atrapa en su matriz los cristales del MOF dando origen a los materiales compuestos (Wang y col., 2019). Por otro lado, en el método de síntesis in situ, se prepara el MOF utilizando los poros del hidrogel. En este método, los cristales de la estructura organometálica crecen dentro de los poros de la matriz polimérica adicionando el precursor metálico y el entrecruzante orgánico (Wang y col., 2019).

La aplicación de compósitos en estado hidrogeles reforzados con MOFs para aplicaciones biomédicas es reciente, por lo que sólo existe algunos ejemplos de estos compósitos usados como bio-sensores, para la liberación controlada de fármacos, materiales antimicrobianos, e ingeniería de tejido: piel y hueso (**Figura 5**). La **Tabla 2** resume algunos trabajos de estos materiales con aplicación en el área biomédica; en ella puede apreciarse el tipo de MOF utilizado, la matriz polimérica y la aplicación biológica a la que fue enfocada.

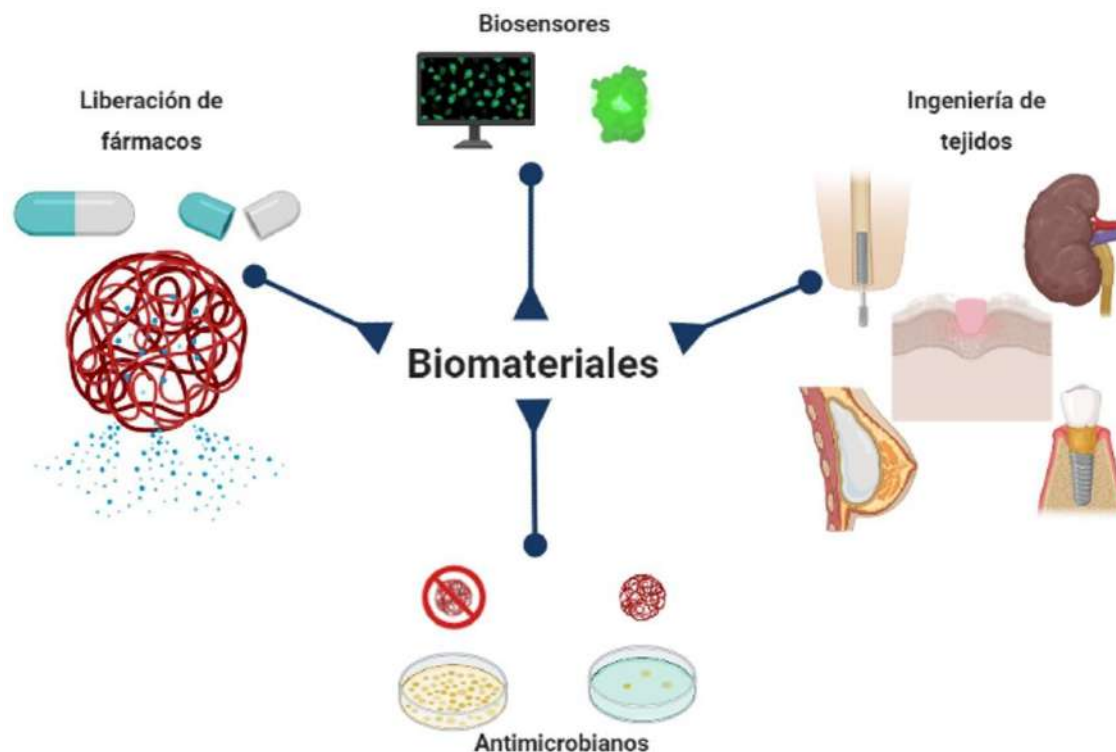


Figura 5. Principales aplicaciones biomédicas de los compósitos hidrogel/MOF

Tabla 2. Resumen de los compósitos hidrogel/MOF (Wang y col., 2019).

Aplicación	MOF /// Matriz	Ref.
Biosensores	UiO-66-NH ₂ /// Agarosa	(Gao y col., 2018)
	[Eu ₂ (BPDC)(BDC) ₂ (H ₂ O) ₂] _n /// Alginato	(Lian y Yan, 2019)
Liberación de fármacos	IRMOF-3 /// PLGA-PEG-PLGA	(Tan y col., 2020)
	MOF-5 /// CMC	(Javanbakht y col., 2020)
	rho-ZMOFs /// HEMA/DHPMA/VP/EGDMA	(Ananthoji y col., 2011)
	ZIF-8 /// Pluronic-127	(Zhang y col., 2020)
	UiO-68 /// Poliacrilamida/ADN	(Chen y col., 2018)

Materiales antimicrobianos	Cu-MOF, Zn-MOF, Co-MOF /// PEGDA	(Gwon y col., 2020)
	AGMNA /// HEMA	(Rossos y col., 2020)
	Ag ₂ [HBTC][im] /// PLA	(Siqi Zhang y col., 2020)
Apósitos de piel	HKUST-1 /// PPCN	(Xiao y col., 2017)
	Zn-vitamina, Cu-vitamina /// Alginato	(Y. Yu y col., 2018)
	ZIF-8 /// Quitosano/PEG	(Mazloom-Jalali y col., 2020)
	PBNPs /// GTAC/quitosano y GMA/quitosano	(Han y col., 2020)
	ZIF-8 /// PVA/imidazol	(Yao y col., 2020)
Tejido óseo	ZIF-8 /// Celulosa/Hidroxiapatita	(Sarkar y col., 2019)

De suma importancia es detectar sustancias o moléculas en fluidos biológicos, ya que estos se pueden relacionar con reacciones alérgicas o fallas en los diversos procesos metabólicos. Por este motivo, hidrogeles reticulados con cationes metálicos dentro de estructuras porosas de MOFs se han empleado como biomarcadores y sensores, como es el caso del trabajo reportado por Lian y Yan (2019) donde obtuvieron MOFs con europio como metal central ($[Eu_2(BPDC)(BDC)_2(H_2O)_2]_n$) en hidrogeles de alginato de sodio reticulado en una solución de hierro para el diagnóstico de anafilaxia por penicilina. Estos materiales presentaron alta sensibilidad para la β -lactamasa al detectarla en suero utilizando luminiscencia. Otro ejemplo de estos materiales aplicados en determinación clínica, es presentado por Gao y col. (2018) quienes utilizaron un hidrogel de agarosa para inmovilizar el MOF (RhB@UiO-66-NH₂) permitiendo obtener una plataforma de detección más sólida. Con lo anterior, la detección de fosfatos pudiera lograrse sumergiendo el compuesto en suero humano, observando el cambio de color de forma visual.

En el caso de la liberación controlada de fármacos en el trabajo propuesto por Tan y col. (2020) se obtuvo un nanocompósito inyectable donde el MOF cargado con Doxorubicina y Celecoxib se integró en hidrogeles termo-sensibles a base de PLA-PEG-PLGA. Dichos compósitos inyectables presentaron excelentes propiedades biológicas en términos de sensibilidad a pH, eficiencia antitumoral, lo que perfila a estos materiales como un vehículo prometedor para el tratamiento de cáncer oral. Dentro de esta misma aplicación se encuentra el nanocompósito obtenido por Javanbakht y col. (2020) en el cual se encapsuló un fármaco anticanceroso (5-fluorouracil) en un MOF basado en zinc (MOF-5) utilizando carboximetil celulosa para proteger y transportar el material a través del tracto digestivo. El uso de esta matriz polimérica sensible al pH permitió una alta dosificación del fármaco durante un periodo de tiempo prolongado haciendo estos materiales excelentes candidatos para sistemas de liberación controlada de fármacos antitumorales. Por otro lado, Zhang y col. (2020) utilizaron Pluronic-127 como matriz de un hidrogel inyectable, sensible al pH y la temperatura, este hidrogel fue cargado con ZIF-8 el cual, a su vez, tenía encapsulado insulina y glucosa oxidasa. Los materiales obtenidos presentaron respuesta a la glucosa permitiendo la liberación autorregulada de insulina, lo que los hace buenos candidatos en el tratamiento de la diabetes tipo I. Dentro de los fármacos que se han estudiado para su liberación controlada se incluyen fármacos antitumorales y anti-inflamatorios (Chen y col., 2018; Tan y col., 2020), hormonas como la insulina (Zhang y col., 2020), agentes anti-arrítmicos (Ananthoji y col., 2011) y materiales antimicrobianos.

Otra de las áreas crecientes en la parte médica, es la elaboración de materiales que inhiban la proliferación bacteriana frenando el desarrollo de riesgos importantes para la salud. En ese sentido Gwon y col. (2020) elaboraron compósitos utilizando MOFs con diferentes centros metálicos (Cu, Co y Zn); incorporándolos en hidrogeles a base de polietilenglicol diacrilado utilizando fotopolimerización con luz UV. Estos materiales fueron probados contra *E. coli* y *S. Aureus* (Bacterias Gram positivo y

Gram negativo respectivamente) resultando ser estables, y presentaron actividad antibacteriana en los MOFs que contenían cobre y cobalto. Bacterias como *S. epidermidis* y *S. aureus* se asocian con la queratitis microbiana, por lo que Rossos y col. (2020) estudiaron la actividad microbiana de hidrogeles de hidroxietilmetacrilato cargados con el MOF AGMNA. Los clusters obtenidos presentaron mejores propiedades antimicrobianas, además, eliminaron las colonias de estas bacterias al contacto, lo que perfila a estos materiales como una buena opción para fabricar lentes de contacto libres de infecciones. Por otro lado, Siqi Zhang y col. (2020) sintetizaron un compuesto de fibras de ácido poli-láctico reforzado con un MOF de iones de plata ($\text{Ag}_2[\text{HBTC}][\text{im}]$) preparado por electrospinning. Dicho material presentó un amplio espectro de antibiosis con buenos rendimientos en la eliminación de bacterias Gram negativo y Gram positivo (inhibiciones del 95.00%). La lenta liberación de iones de Ag^+ del MOF, permite la destrucción del metabolismo energético al producir especies reactivas de oxígeno. Aunado a esto, realizaron pruebas cutáneas en ratas para determinar el efecto curativo antiinfeccioso in vivo, encontrando que estos materiales son excelentes candidatos para la ingeniería de tejidos, ya que, además de prevenir la infección por microorganismos aceleraron la tasa de curación en los roedores.

La ingeniería de tejidos tiene como principal objetivo reparar, trata o reemplazar tejidos y órganos dañados (Motealleh y Kehr, 2017), por lo que se buscan materiales capaces de imitar tanto la estructura del tejido, como sus propiedades biológicas; así como también, cumplir funciones de transporte de masa y propiedades físicas de la parte a sustituir o regenerar, considerando el comportamiento dinámico y estático de la misma (Sheffield y col., 2018).

La fabricación de apósitos para tratar o heridas o enfermedades de la piel es de vital importancia por lo que, aprovechando las propiedades antimicrobianas de los MOFs, estos se han incorporado en hidrogeles a base de biopolímero como apósitos de piel. Si bien, algunos biopolímeros cuentan con actividad antimicrobiana

(como es el caso del quitosano), está en realidad es baja. Han y col. (2020) estudiaron hidrogeles de quitosano modificado con amonio cuaternario y un doble enlace C=C, al cual se le adicionaron partículas de PBNPs para que actuaran como puntos de entrecruzamiento. Estos materiales presentaron excelentes propiedades foto-térmicas las cuales les permiten atrapar bacterias por atracción electrostática, cambiando el potencial de la membrana bacteriana, con esto, lograron la inhibición de la respiración de los microorganismos lo que se reflejó en porcentajes de mortalidad del 99.97% y 99.93% para *S. aureus* y *E. coli*.

Las heridas en piel pueden ser infectadas fácilmente por bacterias en el ambiente lo que podría no solo impedir el proceso de curación, sino que pudiera ocasionar complicaciones mortales, por este motivo se buscan apósitos para heridas que combinen las ventajas de la liberación controlada (propia de los hidrogeles) con las respuestas antimicrobianas de los MOFs. Buscando mejorar la cicatrización de heridas tisulares Yu y col. (2018) prepararon microfibras de hidrogeles de alginato con MOFs cargados con vitaminas de cobre y zinc para mejorar las propiedades antioxidantes y de antibiosis de los materiales compuestos. Estas microfibras de hidrogeles de alginato con iones de zinc y cobre promovieron la formación de nuevos vasos sanguíneos, lo que originó una aceleración significativa en el proceso de cicatrización, además de presentar menor inflamación e infección en comparación con los que no contenían estos iones.

No obstante, el utilizar iones de cobre para tratar heridas promoviendo la angiogénesis, expone a los pacientes a niveles potencialmente tóxicos de estos iones (especialmente cuando se usan sales y óxidos de este ion), lo que no siempre conduce a resultados deseados. Por este motivo, Xiao y col. (2017) utilizaron nanopartículas de un MOF con cobre (HKUST-1 NPs) incrustado dentro de un hidrogel termosensible de poli-(citrato de polietilenglicol-co-N-isopropilacrilamida) (PPCN) con la finalidad de disminuir la citotoxicidad y apoptosis de los iones de cobre. Al recubrir las nanopartículas del MOF con el hidrogel a base de citrato

(PPCN) no solo se disminuyeron los efectos adversos asociados a la liberación de estos iones, sino que, además, se incrementó la migración de las células dérmicas in vitro y el cierre de heridas in vivo mejoró significativamente.

Una subclase de MOF compuesto de iones metálicos de zinc y ligandos de 2-imidazol coordinados en la estructura es el ZIF-8, el cual fue utilizado por Yao y col. (2020) encapsulado en una membrana hidrogel a base de polivinilalcohol (PVA) para promover la cicatrización crónica de heridas. Estas membranas son omnifóbicas reduciendo la adhesión bacteriana y permitiendo la liberación controlada de iones de zinc para matar bacterias. Este MOF, también ha sido estudiado como material de refuerzo en hidrogeles de quitosano y polietilenglicol por Mazloom-Jalali y col. (2020) para sanar heridas de piel liberando cefalexina para disminuir la actividad bacteriana. Además de los buenos resultados contra *B. cerus*, *S. aureus* y *E. coli*, los hidrogeles con ZIF-8 presentaron alta viabilidad celular al probarlos con células de fibroblastos L929. Otra de las ventajas que encontraron es que al incrementar la carga de este MOF se mejoraba la resistencia a la tensión y el módulo de Young.

En el caso de la ingeniería de tejido óseo, son pocos los ejemplos que se encuentran del uso de estos materiales compuestos. Sarkar y col. (2019) estudiaron compósitos de hidrogeles de celulosa/hidroxiapatita con ZIF-8 cargado con dexometasona como sistema de administración local para aplicaciones en ortopedia que requieran carga. Los estudios celulares in vitro mostraron que el nanocompósito sintetizado liberó de manera sostenida el fármaco a lo largo de cuatro semanas, fue compatible con células MC3T3, permitió la diferenciación y acelera la proliferación celular. Aunado a esto, dicho compósito presentó una fuerza y módulos comparables al hueso esponjoso humano.

CONCLUSIONES

Los compósitos en estado hidrogel empleando como rellenos MOFs representan materiales biocompatibles, capaces de modular su biodegradabilidad y los procesos de señalización celular, cuentan además con propiedades mecánicas y antimicrobianas mejoradas con respecto a lo reportado en la literatura. Dichos compósitos pueden ser empleados en la encapsulación de moléculas con propiedades antibióticas, anti-inflamatorias y antioxidantes; la liberación controlada de estas moléculas puede evitar el crecimiento de bacterias y promover la sanación de heridas en piel o fracturas. Por lo que el estudio de estos compósitos representa un área de investigación prometedora en ingeniería de tejido, liberación de fármacos, materiales antimicrobianos y biosensores.

AGRADECIMIENTOS

DACM agradece el apoyo financiero otorgado por el Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP) de la Secretaría de Educación Pública (SEP), con folio UACOAH-PTC-512.

REFERENCIAS

Akhtar, M. F., Hanif, M., & Ranjha, N. M. 2016. Methods of synthesis of hydrogels: A review. *Saudi Pharmaceutical Journal*. 24(5): 554–559.

Ananthoji, R., Eubank, J. F., Nouar, F., Mouttaki, H., Eddaoudi, M., & Harmon, J. P. 2011. Symbiosis of zeolite-like metal-organic frameworks (rho-ZMOF) and hydrogels: Composites for controlled drug release. *Journal of Materials Chemistry*. 21(26): 9587–9594.

Banerjee, S., Lollar, C. T., Xiao, Z., Fang, Y., & Zhou, H. C. 2020. Biomedical Integration of Metal–Organic Frameworks. *Trends in Chemistry*. 2(5): 467–479.

Barbosa, J. S., Figueira, F., Braga, S. S., & Almeida Paz, F. A. (2020). Metal-organic

frameworks for biomedical applications: The case of functional ligands. In M. Mouzafari (Ed), *Metal-Organic Frameworks for Biomedical Applications* (pp. 69–92). [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816984-1.00005-6>

Batool, S. R., Nazeer, M. A., Ekinci, D., Sahin, A., & Kizilel, S. 2020. Multifunctional alginate-based hydrogel with reversible crosslinking for controlled therapeutics delivery. *International Journal of Biological Macromolecules*, 150: 315–325.

Bhardwaj, N., Pandey, S. K., Mehta, J., Bhardwaj, S. K., Kim, K. H., & Deep, A. 2018. Bioactive nano-metal-organic frameworks as antimicrobials against Gram-positive and Gram-negative bacteria. *Toxicology Research*, 7(5): 931–941.

Bonakdar, S., Emami, S. H., Shokrgozar, M. A., Farhadi, A., Ahmadi, S. A. H., & Amanzadeh, A. 2010. Preparation and characterization of polyvinyl alcohol hydrogels crosslinked by biodegradable polyurethane for tissue engineering of cartilage. *Materials Science and Engineering C*, 30(4): 636–643.

Bourke, S. L., Al-Khalili, M., Briggs, T., Michniak, B. B., Kohn, J., & Poole-Warren, L. A. 2003. A photo-crosslinked poly(vinyl alcohol) hydrogel growth factor release vehicle for wound healing applications. *AAPS PharmSci*, 5(4): 1–11.

Chen, J., Sheng, D., Ying, T., Zhao, H., Zhang, J., Li, Y., Xu, H., & Chen, S. 2021. MOFs-Based Nitric Oxide Therapy for Tendon Regeneration. *Nano-Micro Letters*, 13(1): 1–17.

Chen, W. H., Liao, W. C., Sohn, Y. S., Fadeev, M., Cecconello, A., Nechushtai, R., & Willner, I. 2018. Stimuli-Responsive Nucleic Acid-Based Polyacrylamide Hydrogel-Coated Metal–Organic Framework Nanoparticles for Controlled Drug Release. *Advanced Functional Materials*, 28(8): 1–9.

Claudio-Rizo, J. A., Cano Salazar, L. F., Flores-Guia, T. E., & Cabrera-Munguia, D. A. 2020a. Estructuras metal-orgánicas (MOFs) nanoestructuradas para la liberación controlada de fármacos. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencias y*

Nanotecnología, 14(26): 1e-29e.

Claudio-Rizo, J. A., González-Lara, I. A., Flores-Guía, T. E., Cano-Salazar, L. F., Cabrera-Munguía, D. A., & Becerra-Rodríguez, J. J. 2020b. Study of the polyacrylate interpenetration in a collagen-polyurethane matrix to prepare novel hydrogels for biomedical applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 156: 27–39.

Claudio-Rizo, J. A., Mendoza-Novelo, B., Delgado, J., Castellano, L. E., & Mata-Mata, J. L. 2016a. A new method for the preparation of biomedical hydrogels comprised of extracellular matrix and oligourethanes. *Biomedical Materials (Bristol)*, 11(3):035016.

Claudio-Rizo, J. A., Rangel-Argote, M., Muñoz-González, P. U., Castellano, L. E., Delgado, J., Gonzalez-García, G., Mata-Mata, J. L., & Mendoza-Novelo, B. 2016b. Improved properties of composite collagen hydrogels: Protected oligourethanes and silica particles as modulators. *Journal of Materials Chemistry B*, 4(40): 6497–6509.

Coradin, T., Giraud-Guille, M.-M., Helary, C., Livage, J., & Sanchez, C. 2002. A Novel Route to Collagen-Silica Biohybrids. *MRS Proceedings*, 726(200): Q5.2.

Ding, C., Tian, M., Feng, R., Dang, Y., & Zhang, M. 2020. Novel Self-Healing Hydrogel with Injectable, pH-Responsive, Strain-Sensitive, Promoting Wound-Healing, and Hemostatic Properties Based on Collagen and Chitosan. *ACS Biomaterials Science and Engineering*, 6(7): 3855–3867.

Ege, D., Kamali, A. R., & Boccaccini, A. R. 2017. Graphene Oxide/Polymer-Based Biomaterials. *Advanced Engineering Materials*, 19(12): 1700627.

Feng, M., Zhang, P., Zhou, H. C., & Sharma, V. K. 2018. Water-stable metal-organic frameworks for aqueous removal of heavy metals and radionuclides: A review. *Chemosphere*, 209: 783–800.

Gao, N., Huang, J., Wang, L., Feng, J., Huang, P., & Wu, F. 2018. Ratiometric fluorescence detection of phosphate in human serum with a metal-organic frameworks-based nanocomposite and its immobilized agarose hydrogels. *Applied Surface Science*, 459: 686–692.

Gwon, K., Han, I., Lee, S., Kim, Y., & Lee, D. N. 2020. A novel metal-organic frameworks based photo-crosslinked hydrogel system for efficient antibacterial applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(18):20234-20242.

Han, D., Li, Y., Liu, X., Li, B., Han, Y., Zheng, Y., Yeung, K. W. K., Li, C., Cui, Z., Liang, Y., Li, Z., Zhu, S., Wang, X., & Wu, S. 2020. Rapid Bacteria Trapping and Killing of Metal-Organic Frameworks Strengthened Photo-Responsive Hydrogel for Rapid Tissue Repair of Bacterial Infected Wounds. *Chemical Engineering Journal*, 396:125194.

Han, J., Zhou, Z., Yin, R., Yang, D., & Nie, J. 2010. Alginate-chitosan/hydroxyapatite polyelectrolyte complex porous scaffolds: Preparation and characterization. *International Journal of Biological Macromolecules*, 46(2): 199–205.

Horcajada, P., Chalati, T., Serre, C., Gillet, B., Sebrie, C., Baati, T., Eubank, J. F., Heurtaux, D., Clayette, P., Kreuz, C., Chang, J. S., Hwang, Y. K., Marsaud, V., Bories, P. N., Cynober, L., Gil, S., Férey, G., Couvreur, P., & Gref, R. 2010. Porous metal-organic-framework nanoscale carriers as a potential platform for drug delivery and imaging. *Nature Materials*, 9(2): 172–178.

Howarth, A. J., Liu, Y., Li, P., Li, Z., Wang, T. C., Hupp, J. T., & Farha, O. K. 2016. Chemical, thermal and mechanical stabilities of metal-organic frameworks. *Nature Reviews Materials*, 1(15018): 1–15.

Hu, W., Wang, Z., Xiao, Y., Zhang, S., & Wang, J. 2019. Advances in crosslinking strategies of biomedical hydrogels. *Biomaterials Science*. 7(3): 843–855.

Huang, Y., Onyeri, S., Siewe, M., Moshfeghian, A., & Madihally, S. V. 2005. In vitro

characterization of chitosan-gelatin scaffolds for tissue engineering. *Biomaterials*, 26(36):7616–7627.

Javanbakht, S., Hemmati, A., Namazi, H., & Heydari, A. 2020. Carboxymethylcellulose-coated 5-fluorouracil@MOF-5 nano-hybrid as a bio-nanocomposite carrier for the anticancer oral delivery. *International Journal of Biological Macromolecules*, 155: 876–882.

Karimi Alavijeh, R., Beheshti, S., Akhbari, K., & Morsali, A. 2018. Investigation of reasons for metal–organic framework’s antibacterial activities. *Polyhedron*, 156: 257–278.

Kopeček, J. 2007. Hydrogel biomaterials: A smart future? *Biomaterials*, 28(34): 5185–5192.

Lee, Y. J., Chang, Y. J., Lee, D. J., & Hsu, J. P. 2018. Water stable metal-organic framework as adsorbent from aqueous solution: A mini-review. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 93: 176–183.

Lemire, J. A., Harrison, J. J., & Turner, R. J. 2013. Antimicrobial activity of metals: Mechanisms, molecular targets and applications. *Nature Reviews Microbiology*, 11(6): 371–384.

Li, J., Wang, H., Yuan, X., Zhang, J., & Chew, J. W. 2020. Metal-organic framework membranes for wastewater treatment and water regeneration. *Coordination Chemistry Reviews*, 404: 213116.

Lian, X., & Yan, B. 2019. Diagnosis of penicillin allergy: a MOFs-based composite hydrogel for detecting β -lactamase in serum. *Chemical Communications*, 55(2): 241–244.

Liu, H., Peng, H., Xin, Y., & Zhang, J. 2019. Metal-organic frameworks: A universal strategy towards super-elastic hydrogels. *Polymer Chemistry*, 10(18): 2263–2272.

Maitra, J., & Shukla, V. K. 2014. Cross-linking in Hydrogels - A Review. *American Journal of Polymer Science*, 4(2): 25–31.

Mazloom-Jalali, A., Shariatinia, Z., Tamai, I. A., Pakzad, S. R., & Malakootikhah, J. 2020. Fabrication of chitosan–polyethylene glycol nanocomposite films containing ZIF-8 nanoparticles for application as wound dressing materials. *International Journal of Biological Macromolecules*, 153: 421–432.

McKinlay, A. C., Morris, R. E., Horcajada, P., Férey, G., Gref, R., Couvreur, P., & Serre, C. 2010. BioMOFs: Metal-organic frameworks for biological and medical applications. *Angewandte Chemie - International Edition*, 49(36): 6260–6266.

Motealleh, A., & Kehr, N. S. 2017. Nanocomposite Hydrogels and Their Applications in Tissue Engineering. *Advanced Healthcare Materials*, 6(1):1600938.

Nayak, A. K., & Das, B. (2018). Introduction to polymeric gels. In K. Pal, I. Barnejee (Eds) *Polymeric Gels*. Elsevier. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102179-8.00001-6>

Opt Veld, R. C., Walboomers, X. F., Jansen, J. A., & Wagener, F. A. D. T. G. 2020. Design Considerations for Hydrogel Wound Dressings: Strategic and Molecular Advances. *Tissue Engineering - Part B: Reviews*, 26(3): 230–248.

Pandey, A., Dhas, N., Deshmukh, P., Caro, C., Patil, P., Luisa García-Martín, M., Padya, B., Nikam, A., Mehta, T., & Mutalik, S. 2020. Heterogeneous surface architected metal-organic frameworks for cancer therapy, imaging, and biosensing: A state-of-the-art review. *Coordination Chemistry Reviews*, 409: 213212.

Peter, M., Binulal, N. S., Nair, S. V., Selvamurugan, N., Tamura, H., & Jayakumar, R. 2010a. Novel biodegradable chitosan-gelatin/nano-bioactive glass ceramic composite scaffolds for alveolar bone tissue engineering. *Chemical Engineering Journal*, 158(2): 353–361.

Peter, M., Ganesh, N., Selvamurugan, N., Nair, S. V., Furuike, T., Tamura, H., & Jayakumar, R. 2010b. Preparation and characterization of chitosan-gelatin/nanohydroxyapatite composite scaffolds for tissue engineering applications. *Carbohydrate Polymers*, 80(3): 687–694.

Ramirez, A., & Astudillo, L. R. De. 2016. Materiales polimeros de tipo hidrogeles : revisión sobre su caracterización mediante ftir , dsc , meb , met polymers materials type hydrogels : review of their characterization by FTIR , DSC , MEB , MET. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 36(2): 108–130.

Rodríguez-Rodríguez, R., Espinosa-Andrews, H., Velasquillo-Martínez, C., & García-Carvajal, Z. Y. 2020. Composite hydrogels based on gelatin, chitosan and polyvinyl alcohol to biomedical applications: a review. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 69(1): 1–20.

Rossos, A. K., Banti, C. N., Kalampounias, A., Papachristodoulou, C., Kordatos, K., Zoumpoulakis, P., Mavromoustakos, T., Kourkoumelis, N., & Hadjikakou, S. K. 2020. pHEMA@AGMNA-1: A novel material for the development of antibacterial contact lens. *Materials Science and Engineering C*, 111: 110770.

Safaei, M., Foroughi, M. M., Ebrahimpoor, N., Jahani, S., Omid, A., & Khatami, M. 2019. A review on metal-organic frameworks: Synthesis and applications. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 118: 401–425.

Sarkar, C., Chowdhuri, A. R., Garai, S., Chakraborty, J., & Sahu, S. K. 2019. Three-dimensional cellulose-hydroxyapatite nanocomposite enriched with dexamethasone loaded metal–organic framework: a local drug delivery system for bone tissue engineering. *Cellulose*, 26(12): 7253–7269.

Sheffield, C., Meyers, K., Johnson, E., & Rajachar, R. 2018. Application of Composite Hydrogels to Control Physical Properties in Tissue Engineering and Regenerative Medicine. *Gels*, 4(2): 51.

Singh, A., Sharma, P. K., Garg, V. K., & Garg, G. 2010. Hydrogels: A review. *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research*, 4(2): 97–105.

Tabata, Y. 2009. Biomaterial technology for tissue engineering applications. *Journal of the Royal Society Interface*, 6:S311-S324.

Tan, G., Zhong, Y., Yang, L., Jiang, Y., Liu, J., & Ren, F. 2020. A multifunctional MOF-based nanohybrid as injectable implant platform for drug synergistic oral cancer therapy. *Chemical Engineering Journal*, 390: 124446.

Thakur, S., Sharma, B., Verma, A., Chaudhary, J., Tamulevicius, S., & Thakur, V. K. 2018. Recent progress in sodium alginate based sustainable hydrogels for environmental applications. *Journal of Cleaner Production*, 198: 143–159.

Tsou, T. L., Tang, S. T., Huang, Y. C., Wu, J. R., Young, J. J., & Wang, H. J. 2005. Poly(2-hydroxyethyl methacrylate) wound dressing containing ciprofloxacin and its drug release studies. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 16(2): 95–100.

Tylingo, R., Gorczyca, G., Mania, S., Szweda, P., & Milewski, S. 2016. Preparation and characterization of porous scaffolds from chitosan-collagen-gelatin composite. *Reactive and Functional Polymers*, 103: 131–140.

Vedadghavami, A., Minooei, F., Mohammadi, M. H., Khetani, S., Rezaei Kolahchi, A., Mashayekhan, S., & Sanati-Nezhad, A. 2017. Manufacturing of hydrogel biomaterials with controlled mechanical properties for tissue engineering applications. *Acta Biomaterialia*, 62: 42–63.

Wahid, F., Zhong, C., Wang, H. S., Hu, X. H., & Chu, L. Q. 2017. Recent advances in antimicrobial hydrogels containing metal ions and metals/metal oxide nanoparticles. *Polymers*, 9(12): 636.

Wang, L., Xu, H., Gao, J., Yao, J., & Zhang, Q. 2019. Recent progress in metal-organic frameworks-based hydrogels and aerogels and their applications. *Coordination Chemistry Reviews*, 398: 213016.

Wu, J., & Sailor, M. J. 2009. Chitosan hydrogel-capped porous SiO₂ as a pH responsive nano-valve for triggered release of insulin. *Advanced Functional Materials*, 19(5): 733–741.

Wyszogrodzka, G., Marszałek, B., Gil, B., & Dorozyński, P. 2016. Metal-organic frameworks: Mechanisms of antibacterial action and potential applications. *Drug Discovery Today*, 21(6): 1009–1018.

Xiao, J., Chen, S., Yi, J., Zhang, H. F., & Ameer, G. A. 2017. A Cooperative Copper Metal–Organic Framework-Hydrogel System Improves Wound Healing in Diabetes. *Advanced Functional Materials*, 27(1): 1–10.

Yao, X., Zhu, G., Zhu, P., Ma, J., Chen, W., Liu, Z., & Kong, T. 2020. Omniphobic ZIF-8@Hydrogel Membrane by Microfluidic-Emulsion-Templating Method for Wound Healing. *Advanced Functional Materials*, 30(13): 1–9.

Yu, X., Zhao, T., Qi, Y., Luo, J., Fang, J., Yang, X., Liu, X., Xu, T., Yang, Q., Gou, Z., & Dai, X. 2018. In vitro Chondrocyte Responses in Mg-doped Wollastonite/Hydrogel Composite Scaffolds for Osteochondral Interface Regeneration. *Scientific Reports*, 8(1): 1–9.

Yu, Y., Chen, G., Guo, J., Liu, Y., Ren, J., Kong, T., & Zhao, Y. 2018. Vitamin metal-organic framework-laden microfibers from microfluidics for wound healing. *Materials Horizons*, 5(6): 1137–1142.

Zhang, C., Hong, S., Liu, M., Yu, W., Zhang, M., & Zhang, L. 2020. pH-sensitive MOF integrated with glucose oxidase for glucose-responsive insulin delivery. *Journal of Controlled Release*, 320: 159–167.

Zhang, Shu, Pei, X., Gao, H., Chen, S., & Wang, J. 2019. Metal-organic framework-based nanomaterials for biomedical applications. *Chinese Chemical Letters*. 31(5): 1060-1070.

Zhang, Siqi, Ye, J., Sun, Y., Kang, J., Liu, J., Wang, Y., Li, Y., Zhang, L., & Ning, G. 2020. Electrospun fibrous mat based on silver (I) metal-organic frameworks-poly(lactic acid) for bacterial killing and antibiotic-free wound dressing. *Chemical Engineering Journal*, 390: 124523.

Zhu, J. 2010. Bioactive modification of poly(ethylene glycol) hydrogels for tissue engineering. *Biomaterials*, 31(17): 4639–4656.

Yacimientos y métodos extractivos para la recuperación de litio a partir de espodumenas. Una revisión.

Deposits and extractive methods for the recovery of lithium from spodumens. A review.

Diego Tamayo-Soriano^a Francisco Raúl Carrillo-Pedroza^b Antonia Martínez-Luévanos^a Ma. de Jesús Soria-Aguilar^b Patricio Navarro-Donoso^c

^a Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Ing. Cárdenas Valdez S/N, República, 25280, Saltillo, Coahuila, México

^b Facultad de Metalurgia, Universidad Autónoma de Coahuila, Carretera 57 Km 5, 25710 Monclova, Coahuila, México

^c Departamento de Metalurgia, Universidad de Santiago de Chile, Av. Las Sophoras 175, Estación Central/ código postal: 9170020, Santiago, Chile

Correspondencia para autor: Diego Alejandro Tamayo Soriano
Universidad Autónoma de Coahuila
Correo electrónico: dtamayo@uadec.edu.mx

Resumen

Esta revisión tiene dos objetivos principales. El primero es poner en el contexto global, los dos tipos de yacimientos de litio como principales fuentes de extracción. El segundo, está enfocado principalmente en resumir los principales métodos de recuperación de litio a partir de espodumena. En lo que respecta a la espodumena, varios estudios se han realizado sobre la extracción de litio desde la α -espodumena en su forma natural, así como los pretratamientos utilizados para transformar a β -espodumena, proceso que influye de manera directa en la optimización del procesamiento y su extracción.

Palabras claves: Litio; yacimientos; ambiente sedimentario e ígneo; pirohidrometalurgia

Abstract

This review has two main objectives. The first one is to put in the global context, the two types of lithium deposits as the main sources of extraction. The second one is mainly focused on summarizing the main lithium recovery methods from spodumene. As regards spodumene, several studies have been carried out on the extraction of lithium from α -spodumene in its natural form, as well as the pretreatments used to transform β -spodumene, a process that directly influences the optimization of the processing and its extraction.

Key words: Lithium; ores; spodumene; sedimentary and igneous environment; pyro-hydrometallurgy

1. Introducción

1.1. Litio

El litio es el metal más ligero de la naturaleza. Geológicamente, tiende a concentrarse en sedimentos arcillosos. Sus concentraciones son variables,

pudiendo albergar depósitos de gran interés económico (p. ej. en zonas de salares). En cuanto a las rocas ígneas (Tabla 1) se presenta en las rocas diferenciadas. En los granitos, así como en las pegmatitas graníticas, su enriquecimiento puede generar mineralización de litio. (Rósler y Lange, 1972; London, 2014).

Tabla 1. Contenido medio en Li en ppm en rocas ígneas.(fuente)

Tipo de Roca	Contenido de litio (ppm)	Autor
Riolitas	50	
Dioritas	20	
Granodioritas	20	
Granitos alto Ca	24	Turekian y Wedepohl (1961)
Granitos bajo Ca	40	
Sienitas	28	
Sienitas nefelínicas	20	

1.2 Mineralogía

Se conocen algo más de 30 minerales de litio que tienen como características comunes una baja densidad (2.3 a 33 g/cm³) y bajos contenidos relativos en Li₂O. El litio suele reemplaza isomórficamente a Fe, Mg y B, fundamentalmente en micas. Además de sus minerales propios, puede entrar a formar parte de las redes de muchos otros minerales, tales como micas (biotita, moscovita, lamprofilíta, flogopita), anfíboles (hornblenda), piroxenos (egirina), ciclosilicatos (berilo), etc. Los principales minerales de litio son silicatos y fosfatos y aparecen casi exclusivamente en pegmatitas graníticas y, en menor medida, en sienitas nefelínicas, en donde destaca la espodumena. (Vlasov, 1966).

A continuación se mencionan algunas de las características más relevantes de la espodumena:

Su composición está dada por Li₂O 8.0%; Al₂O₃ 27.4%; SiO₂; 64.6%. Tiene una pequeña cantidad de sodio reemplazando al litio. La estructura de la espodumena es la misma que poseen otros piroxenos. Se altera fácilmente a otras especies,

volviéndose mate, dando como producto de alteración minerales arcillosos, albita, moscovita y microclina (Deer et al., 1992).

Se encuentra naturalmente como un cristal monoclinico llamado α -espodumena. Cristaliza en el grupo espacial C2/c. Cuando sufre una modificación en su estructura cristalina, se le conoce β -espodumena (Tabla 2), que tiene una estructura tetragonal. Esta estructura cristalina no está tan empaquetada como la α -espodumena. (Li y Peacor, 1968).

Tabla 2. Estructura cristalina de α espodumena y β espodumena.

Fase	Estructura cristalina	Referencia
LiAlSi ₂ O ₆	Monoclinica	Welsch et al. (2015)
LiAlSiO ₆	Tetragonal	Li y Peacor (1968)

2. Tipos de yacimientos de Litio

2.1 Ambiente sedimentario

De acuerdo a Garrido (1992), la generación de este tipo de yacimientos puede deberse a dos principales factores:

- 1) Geológicos: existencia de cuencas cerradas que favorezcan la concentración y precipitación de las sales, evitando la dispersión de los elementos en solución.
- 2) Climáticos: de los cuales el más relevante es la existencia de un clima árido, favoreciendo así la concentración de los elementos metalogénicos. Los principales yacimientos de este tipo se encuentran en el oeste de América, asociados a rocas volcánicas ácidas principalmente en USA, Chile y Bolivia. (Tabla 3)

2.2 Ambiente magmático

Dentro de la geología económica, los especialistas colocan a los depósitos de pegmatitas a la par con otros minerales asociados al granito (Lindgren, 1913), y por tal motivo, este tipo de rocas continúan siendo fuentes únicas o importantes de metales raros y minerales industriales utilizados en la industria del vidrio y cerámicos (Glover et al., 2012; Linnen et., 2012; Simmons et al., 2012). Aunque las pegmatitas han sido estudiadas exhaustivamente en sus muchas partes, han recibido sorprendentemente poca investigación, sobre todo en el campo de la petrografía. En el caso de la espodumena, constituye la principal fuente de obtención de este elemento a partir de pegmatitas, se destacan los yacimientos de Tanco (Canadá), Kings Mountains (EE.UU.), Greenbushes (Australia), Eikita (Zimbabwe), etc.

Bajo este contexto, puede establecerse una clasificación de los yacimientos de litio en dos grandes grupos, según se trate de yacimientos de ambiente sedimentario o de ambiente ígneo. (Tabla 3).

Tabla 3. Clasificación de los principales yacimientos de Li en función del ambiente de formación. Garrido (1992)

Ambiente	Tipo	Localidad
Sedimentario	Salmueras	Salar de Atacama (Chile), Uyuni (Bolivia), Searles Lake y Salt Lake (EE.UU.) Salton Sea (EE.UU.)
		Pennsylvania y Michigan (EE.UU.) Hector y Overton Valley (EE.UU.)
Magmático	Pegmatitas graníticas, granitos y mineralizaciones hidrotermales asociadas	Greenbushes (Australia) Mt Holland (Australia)

Aunque los minerales de pegmatita fueron la fuente predominante de litio por muchas décadas, varias operaciones mineras que involucran pegmatitas y otras fuentes minerales para el beneficio de Li, se están desarrollando o se encuentran en etapas avanzadas de desarrollo en Australia, Canadá, China, Finlandia, Serbia y México (U.S. Geological Survey, 2017)

En lo particular en México, actualmente no se cuenta con ningún yacimiento de litio en explotación; no obstante, a la fecha se encuentran en etapa de exploración tres yacimientos que contienen este mineral en los Estados de Baja California, San Luis Potosí, Zacatecas y Sonora. (Tabla 4).

Tabla 4. Estados de la República Mexicana con potencial de litio (Servicio Geológico Mexicano, 2018)

Estado	Observaciones
Baja California	La empresa Pan American Lithium estudia el reprocesamiento de una salmuera residual, producto de la operación de la planta de generación geotérmica de Cerro Prieto, perteneciente a la Comisión Federal de Electricidad.
San Luis Potosí-Zacatecas	El Proyecto se ubica en la parte occidental del estado de San Luis Potosí, en el Altiplano semidesértico en la zona limítrofe con el Estado de Zacatecas, dentro de los municipios de Salinas, Santo Domingo, Villa de Ramos, en S.L.P. y Villa de Cos, en el Estado de Zacatecas. Las rocas que afloran en el área de estudio están constituidas por material volcánico y sedimentario de origen continental.
Sonora	Bacanora Minerals continúa desarrollando el proyecto de litio de Sonora, del cual la firma espera producir 17,500 toneladas de carbonato de litio para 2019-2020, y

luego aumentarlo a 35,000 toneladas anualmente. Las rocas que afloran en el área de estudio están formadas por rocas volcánicas representadas litológicamente por basalto-andesita, riolita e ignimbrita, así como por dos horizontes de arcilla constituidos básicamente por material volcánico, que desde el punto de vista económico resultan atractivas por sus contenidos de litio.

3. Metalurgia extractiva del litio

3.1 A partir de espodumena

Actualmente, el litio se extrae de las salmueras (An et al., 2012) y espodumena, que es el mineral más abundante de litio. A medida que aumenta su demanda las, investigaciones de extracción de otros minerales de litio han cobrado importancia.

Los estudios recientes han demostrado la posibilidad de recuperación de litio de Petalita (Sitando y Crouse, 2012; Sitando, 2012), Lepidolita (Luong et al., 2013, 2014; Yan et al., 2012a, 2012b), Zinwaldita (Martin et al., 2017a, 2017b; Schneider et al., 2017), y también arcillas (Siame y Pascoe, 2011; Siame, 2011). Además, que el litio proveniente de las baterías usadas en la vida cotidiana, estos materiales han empezado a ser estudiados a escala laboratorio (Meshram et al., 2014).

Mineralógicamente las impurezas en la estructura de la espodumena como Fe, Mn, Mg, Na y Ti, da como resultado, diferentes colores como blanco, gris, amarillo, verde y morado (Claffy 1953; Gabriel et al., 1942; Salakjani et al., 2016, 2017, 2019a; Zelikman et al., 1996). Sin embargo, estas impurezas pueden interferir en el proceso de extracción.

Para poder obtener un beneficio del mineral de espodumenas, el proceso implica la trituración, separación, separación magnética y flotación (Garrett, 2004; Gibson et

al., 2017) y el resultado de este beneficio puede producir diferentes grados de concentrado de espodumena para una variedad de aplicaciones.

Aunque el concentrado de espodumena después del beneficio contiene hasta 7.6% de Li_2O . Los estudios han demostrado que el mineral presenta cierta refractariedad a los procesos de extracción (Djingheuzian, 1957; García, 1984), por tal motivo, el proceso implica hacer un cambio en la estructura del mineral para volverlo reactivo y hacer posible que los reactivos a utilizar acceden a la estructura atómica del litio. Esto se logra actualmente por calcinación, que implica calentar el concentrado a temperaturas superiores a 1000 °C (Ellestad y Leute, 1950; White y McVay, 1958). Sin embargo, investigaciones han revelado que la irradiación de microondas y la activación mecánica de la espodumena, son factores que sirven para hacer más eficiente producir fases reactivas (Kotsupalo et al., 2010; Peltosaari et al., 2015).

En los últimos años, la espodumena ha atraído mucho interés como fuente de obtención de litio ya que las fuentes de salmuera por sí solas no pueden satisfacer la creciente demanda de litio (Egbue y Long, 2012), por lo que se han implementado tecnologías para obtener litio directamente del mineral.

Como ya se ha mencionado con anterioridad, la espodumena es el mineral de litio más abundante entre los depósitos de roca dura. El α -espodumena natural es un mineral refractario. Normalmente en todos los métodos prácticos de extracción (Figura 1), el proceso de calcinación y tostación como etapa de pretratamiento es necesario para transformar el mineral a su fase menos refractaria (β -espodumena) donde la necesidad del pretratamiento de dicho mineral y sus cambios de estructura a través de pretratamientos son ampliamente explicados por Salakjani, Singh y Nikoloski (2019).

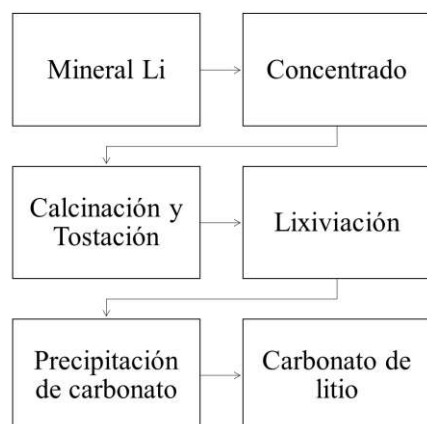


Figura 1. Diagrama de flujo donde se muestran las etapas llevas a cabo en la extracción de litio a partir de pegmatitas. (fuente)

También existen diferentes reactivos químicos que pueden extraer litio a través de lixiviación (Tran y Luong, 2015). Con un aumento en su demanda, el número de los estudios sobre recursos y métodos de extracción y producción de sales de litio de alta pureza están aumentando rápidamente. En consecuencia, los artículos de investigación útiles sobre este tema se encuentran publicados recientemente (Choubey et al., 2016; Dessemond et al., 2019; Meshram, Pandey y Mankhand, 2014; Zagal, 2017). De igual forma (Karrech et al., 2020) ha revisado todos los recursos de litio disponibles y métodos de extracción, debido a la importancia del espodumena como fuente de litio y su impacto en el mercado.

Una revisión exhaustiva de todos los métodos experimentados de recuperación de litio en espodumena han llevado a revisar los procesos donde se clasifican en dos principales grupos, Bajo los procesos pirometalúrgicos, el tostado de la espodumena con un reactivo químico se realiza como el proceso extractivo principal, que posteriormente implica lixiviación para separar el litio del material insoluble (Averill y Olson, 1978; Choubey et al., 2016; Garrett, 2004; Meshram, Pandey y Mankhand, 2014).

3.1.1. *Proceso pirometalúrgico*

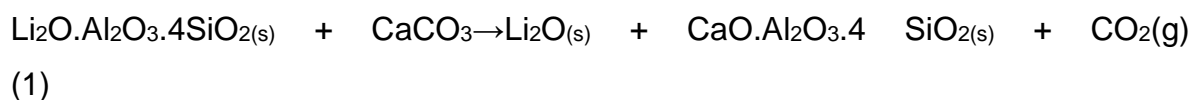
Los procesos pirometalúrgicos incluyen la transformación de α - a β - espodumena con o sin reactivo, con el objetivo de descomponer su estructura cristalina. Este tratamiento a menudo va seguido por el proceso de lixiviación. (Tabla 5)

A continuación, se mencionan los métodos pirometalúrgicos comúnmente utilizados junto con las tendencias a seguir:

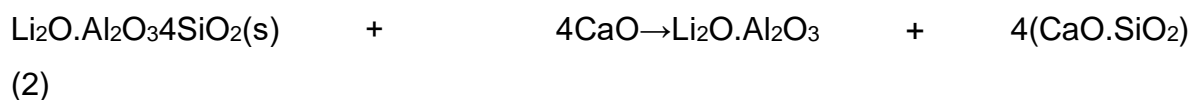
3.1.1.1 *Proceso de encalado*

El proceso de encalado consiste en tostar la espodumena a temperaturas superiores a 1000 °C con cal (CaO) o piedra caliza (CaCO₃). El tostado a temperaturas tan elevadas provoca la descomposición de la espodumena. Este proceso es seguido por la lixiviación con agua para disolver y recuperar sales de litio (Zelikman, et al., 1966).

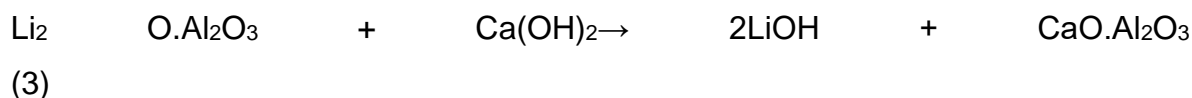
Se han reportado que la tostación de finas partículas de espodumena y piedra caliza a temperaturas entre 1000 °C y 1230 °C seguidas de lixiviación con agua caliente, ha dado casi un 80% de extracción de litio (Nicholson, 1946). La ecuación (1) muestra la reacción que tiene lugar durante proceso.



La adición de yeso a la alimentación a temperaturas de 1100°C, junto con la lixiviación en CaCl₂ en lugar de agua se ha reportado con incremento en la extracción hasta de un 86% (Hayes, et al., 1950). El tostado de la espodumena y la cal, se produce de acuerdo con siguiente reacción que da como resultado la formación aluminato de litio y silicatos de calcio.

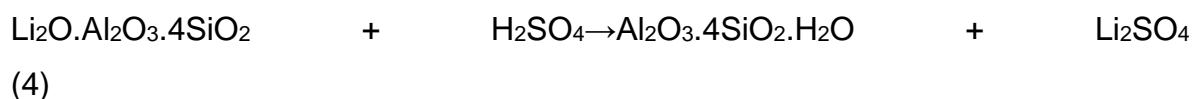


Por otro lado, también en este proceso se ha producido LiOH como se muestra en la Ecuación (3) (Zelikman, et al., 1966). Se ha demostrado que este compuesto (hidróxido de litio) se puede convertir en otras sales que son aplicables en distintas aplicaciones industriales (Pandey y Mankhand, 2014)



3.1.1.2. Tostación ácida

Dentro del proceso de tostación, también se reporta el tostado ácido de espodumena (también conocido como horneado ácido). Este proceso comienza con la calcinación del mineral de espodumena a temperaturas por encima de 1000 °C (Salakjani, Singh y Nikoloski, 2016; Salakjani, et al., 2017; Salakjani, Singh y Nikoloski, 2019a). Mediante este proceso, α -espodumena se convierte en β -espodumena que tiene una estructura menos compacta y permite que la especie de litio sea penetrada por el ácido. Durante el proceso, al realizar una mezcla de β -espodumena y ácido sulfúrico, utilizando una temperatura entre 200 ° C y 300 ° C que produce un residuo insoluble en agua y Li_2SO_4 soluble. Estos subproductos pueden separarse mediante lixiviación de agua (Dessemond et al., 2018; Ellestad y Leute, 1950). En esto proceso, los iones de hidrógeno reemplazan a los iones de litio en la estructura de β -espodumena mientras que el aluminio y el silicio permanecen en el residuo como se muestra en la Ecuación (4).



Utilizando temperaturas superiores a 225 °C en este proceso, se reportan valores de extracción de más del 95%. Sin embargo, autores como Djingheuzian (1957); Ellestad y Leute (1950); Salakjani, et al. (2019b) han demostrado que utilizar temperaturas por encima de los 300°C, pueden afectar negativamente el proceso de extracción.

De igual forma se reporta que al momento de la interacción del mineral espodumena y el agente lixivante, para este caso el ácido, al no estar en valores estequiométricos, disminuye el porcentaje de extracción desde un mínimo del 30% (Dessemond et al., 2018; Lajoie-Leroux et al., 2018; Salakjani, Singh y Nikoloski, 2019b).

Sin embargo, autores como (Lajoie-Leroux et al., 2018), mencionan que el exceso de ácido depende del tamaño de partícula con la cual se esté llevando a cabo la extracción, junto con la cantidad de temperatura y el tiempo del proceso. Este método de extracción se ha mantenido más o menos igual desde los años 60, donde se han tenido conocimientos que el proceso de tostación ácida para ciertos grados de espodumena, han alcanzado de 85% a 90% de extracción (Robinson 1961). El tostado ácido con HCl concentrado también ha dado como resultado extracciones superiores al 90% (Djingheuzian, 1957; Reader, 1957) en la forma de LiCl.

3.1.1.3. Tostación por sulfatación

Para este proceso de tostación por sulfatación se añade una mezcla de SO₂, O₂, donde el SO₃ en consecuencia, tiende a descomponer la estructura cristalina de la espodumena a ~ 800 ° C. El producto que se extrae es el sulfato de litio (MacEwan, 1961; Sharratt, 1955).

Aunque el proceso fue más efectivo en β-espodumena con extracción de litio de 60% a 93% (Sharratt, 1955), las α-espodumenas con tamaños de partícula de menos de 30 mm también puede ser tratados a través de este proceso (MacEwan, 1961). El aumento de la temperatura aumenta la recuperación de litio pero por encima de 880 °C, la extracción disminuye al aumentar la temperatura debido a la fusión del Li₂SO₄ (punto de fusión de 859 ° C) y sinterización de las partículas (Sharratt, 1955). Además, el litio y los residuos reaccionan para formar un silicato de litio insoluble similar a β-espodumena (Salakjani, Singh y Nikoloski, 2019b). Este proceso se ha visto afectado por los gases expedidos de SO₂, lo cual lo vuelve un

método de extracción tóxico. Este proceso necesita un monitoreo de los gases ya que el SO_2 es tóxico.

3.1.1.4. Tostación por cloración

Este procedimiento extractivo de litio, consiste en tostar un mineral de litio que contiene mica y espodumena con Na_2SO_4 a 700°C durante 40 min, seguido de lixiviación, donde se reportan extracciones 70.6% de litio (Natasha et al., 2018). Estos autores observaron que la formación de β -espodumena comenzó a 700°C y la sanidina ($\text{AlLiO}_8\text{Si}_3$) comenzó a formarse a 750°C .

3.1.1.5. Tostación cáustica

Tostar con solo NaOH fue investigado por Catovic (2018). El material de alimentación era mineral de espodumena, pero no se informó el procedimiento de la alimentación. Reportan el uso de espodumena triturada a ($40\text{-}100\ \mu\text{m}$) se mezcló con una proporción de 2.6 a 4.8 del mineral y NaOH a temperatura entre 250°C y 350°C durante 1 a 6 h. Se reportó extracción de litio en 90%.

Tabla 5. Métodos pirometalúrgico para la extracción de litio a partir de espodumenas.

Métodos pirometalúrgico	Producto	Aditivo	Temperatura °C	Referencias
Tostación ácida	α- espodumena β- espodumena	H ₂ SO ₄	200-300	Ellestad and Leute 1950; Dessemond et al. 2018
Tostación por sulfatación	β- espodumena	SO ₂ + O ₂	800-900 y 225-425	Sharratt 1955
Tostación por cloración	β- espodumena	Na ₂ SO ₄	700	Natasha et al., 2018
Tostación cáustica	α- espodumena β- espodumena	NaOH Fundido aluminio- magnesio	250-350 >900	Catovic 2018; Mast 1989

3.1.2. Proceso Hidrometalúrgico

A continuación, se mencionan los métodos hidrometalúrgicos comúnmente utilizados para la extracción de litio. (Tabla 6)

3.1.2.1. Lixiviación ácida

Para este proceso, diversos autores como (Rosales, Ruiz y Rodríguez, 2014) reportan lixivitaciones en medio ácido, utilizando HF. El proceso requiere temperaturas bajas ~ 70 ° C) y tiempos de lixiviación cortos (25 min). Para estos experimentos se consideró el tamaño de las partículas, utilizando fracciones de (-850 + 300 μm, -300 + 85 μm y -85 +45 μm) para lixiviación con HF. Los resultados mostraron que el 99% del litio se extrajo de la fracción -85 + 45 μm. En la extracción

de litio de $-300 + 85 \mu\text{m}$ y $-850 + 300 \mu\text{m}$, las fracciones fueron 92% y 78%, respectivamente.

Por otro lado, (Guo et al., 2017) se han realizado lixiviaciones utilizando α -espodumena con una mezcla de HF y H_2SO_4 , logrando valores de extracción de hasta un 96% de litio a 100°C , con una relación mineral/HF/ H_2SO_4 de 1: 3: 2.

De igual forma, en los procesos extractivos de lixiviación en un medio ácido, se han reportado lixiviaciones con HCL. Este método es uno de los procesos más antiguos empleados para la extracción de litio (Schreck, 1957). Se puede lograr una alta extracción de Li en el punto de ebullición del ácido (Sharma, 2014a, 2014b), sin embargo, este método y sus valores de extracción son confidenciales.

3.1.2.2. Lixiviación alcalina

Se tiene conocimiento que en la segunda mitad de la década de los 40's, Nicholson (1946) introdujo otro método de extracción de litio a partir de espodumena. β -espodumena con tamaños de partículas de 45 a $75 \mu\text{m}$, utilizando cal y agua caliente a una temperatura entre 100°C y 205°C y a presiones de 15 a 250 psi. El litio se disolvió como LiOH. Se logró una extracción del 90%.

De igual forma, (Song et al., 2019) estudiaron la lixiviación alcalina en α -espodumena en un rango de temperatura de 160 a 250°C . La extracción a 250°C se reportó con los valores más altos ($> 90\%$).

3.1.2.3. Biolixiviación

Se tiene conocimiento que (Rezza et al., 1997) intentaron lixiviar espodumenas de un yacimiento, utilizando *Penicillium purpurogenum*, *Aspergillus niger* y *Rhodotorula rubra* reportando que los microorganismos pueden acelerar la lixiviación de elementos como el Li, Al y Si, produciendo ácidos orgánicos como ácido oxálico y ácido cítrico (Rezza et al., 2000).

Debido a los escasos trabajos realizados en el campo de la biolixiviación. Se considera que es un proceso que necesita de un mayor tiempo de investigación y pruebas, para poder confirmar que es un proceso viable en el ámbito comercial. Esto ha generado que se sigan llevando a cabo los métodos tradicionales.

En cuanto a los métodos hidrometalúrgicos en medio ácido y alcalino respectivamente, se tiene conocimiento, que al lixiviar β -espodumena, normalmente incluye un proceso previo de calcinación para lograr la transformación en la estructura cristalina de la espodumena y así poder lograr mayores tasas de extracción. Por otro lado, los trabajos reportados en la lixiviación de α -espodumenas han alcanzado valores de extracción favorables. Al realizarse con ácidos fuertes, es necesario el establecimiento de una metodología de manipulación para su uso correcto y seguro.

Tabla 6. Métodos hidrometalúrgicos para la extracción de litio a partir de espodumenas.

Métodos hidrometalúrgicos	Producto	Aditivo	Temperatura °C	Referencias
Lixiviación ácida	α y β espodumena			Rosales, Ruiz and
	α y β espodumena	HF	70 – 100	Rodriguez
	α espodumena	H ₂ SO ₄ + HF	~100	2014; Guo et al. 2019;
	α espodumena	H ₂ SO ₄ + CaF ₂	~100	Griffith et al. 2018;
	β espodumena	HCL	90 - 100	Sharma, 2014b
Lixiviación alcalina	α y β espodumena	NaOH	200 - 300	Catovic 2018; Song et al. 2019

Biolixiviación	β espodumena	Penicillium purpurogenum Aspergillus niger Rhodotorula	NA	Rezza et al. 2000
----------------	-----------------------	--	----	----------------------

4. Conclusiones

Gracias a los avances tecnológicos en cuestión geológico-minero, se ha podido generar un conocimiento basto de los tipos de yacimientos que albergan a este mineral y empleando los procesos extractivos adecuados, se ha demostrado una creciente optimización en su beneficio.

En cuestión de procesamiento y extracción, la ciencia y la investigación de grandes empresas mineras y Universidades, han enfocado sus esfuerzos a la optimización en los costos, los cuales pueden variar en función del yacimiento y/o fuente de extracción.

Debido a lo anterior, la obtención de carbonato de litio como materia prima, suele ser de mayor rentabilidad a partir de las salmueras y de menor impacto medioambiental, en comparación al litio extraído desde pegmatitas.

Los proceso iniciales de extracción de litio a partir de espodumena, conllevan una descomposición en sus estructura cristalina, con el objetivo principal de extraer únicamente el litio y deshacerse de las impurezas que lleva consigo. Este proceso, consiste en la calcinación de α - espodumena en muflas. Se utilizan temperaturas superiores a los 1000 ° C y normalmente, durante este proceso, quedan elementos no deseados los cuales deben ser removidos por lixiviación.

Durante el proceso de lixiviación, se ha utilizado ácido sulfúrico como el método convencional de disolución. Otros métodos de lixiviación con ácido, también se han

reportado, como la utilización de ácido nítrico y clorhídrico, generando un gran impacto medioambiental.

En extracción por el método hidrometalúrgico, se ha puesto énfasis en los últimos años en los métodos biolixiviantes. Las soluciones de algunas sales de sodio son eficaces en promover la extracción de litio a través de un proceso de intercambio iónico, que puede reducir la disolución de otros elementos en la solución de lixiviación, en comparación con los métodos que implican la descomposición de la espodumena.

Finalmente, se considera que para generar una optimización en los procesos extractivos de litio, se debe tener especial cuidado en los parámetros utilizados durante el circuito de extracción, esto implica, seguir detallando e investigando los factores de la temperatura, tipo de reactivo durante la lixiviación, concentración del reactivo, tiempo de reacción, sin dejar de lado los parámetros durante los procesamientos primarios, como tamaño de partícula durante la molienda, grado de liberación, etc.

De estos factores dependerán las tasas de extracción de litio y la calidad de pureza de la materia prima, que por consecuencia se verá reflejado en el mercado.

5. Referencias bibliográficas

- An, J. W., Kang, D. J., Tran, K. T., Kim, M. J., Lim, T., & Tran, T. (2012). Recovery of lithium from Uyuni salar brine. *Hydrometallurgy*, 117, 64-70.
- Averill, W. A., & Olson, D. L. (1978). A review of extractive processes for lithium from ores and brines. *Lithium Needs and Resources*, 305-313.
- Catovic, E. (2018). Caustic digestion process. International Patent No.WO2018/023159 A1.
- Choubey, P. K., Kim, M. S., Srivastava, R. R., Lee, J. C., & Lee, J. Y. (2016). Advance review on the exploitation of the prominent energy-storage element:

Lithium. Part I: From mineral and brine resources. *Minerals Engineering*, 89, 119-137.

- Dessemond, C., Lajoie-Leroux, F., Soucy, G., Laroche, N., & Magnan, J. F. (2018). Revisiting the traditional process of spodumene conversion and impact on lithium extraction. In *Extraction 2018* (pp. 2281-2291). Springer, Cham.
- Dessemond, C., Lajoie-Leroux, F., Soucy, G., Laroche, N., & Magnan, J. F. (2019). Spodumene: The lithium market, resources and processes. *Minerals*, 9(6), 334.
- Djingheuzian, L. E. (1957). Metallurgy developments in recovery of some of less common metals in Canada. In *Symposium of extrication and refining of the rare metals*, London Institute of Mining and Metallurgy, London, UK (pp. 75-81).
- Egbue, O., & Long, S. (2012). Critical issues in the supply chain of lithium for electric vehicle batteries. *Engineering Management Journal*, 24(3), 52-62.
- Ellestad, R. B., & Milne, L. K. (1950). U.S. Patent No. 2,516,109. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Ellestad, R. B., & Milne, L. K. (1950). U.S. Patent No. 2,516,109. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Garcia, H. J. (1984). Lithium extraction from spodumene and lepidolite by pressure leaching with sodium carbonate (Doctoral dissertation, New Mexico Institute of Mining and Technology).
- Garrett, D. E. (2004). *Handbook of lithium and natural calcium chloride*. Elsevier.
- Gibson, C., Aghamirian, M., & Grammatikopoulos, T. (2017). A review: the beneficiation of lithium minerals from hard rock deposits. *SME Annual Meeting*, Denver, Colorado
- Glover, A. S., Rogers, W. Z., & Barton, J. E. (2012). Granitic pegmatites: storehouses of industrial minerals. *Elements*, 8(4), 269-273.
- Guo, H., Kuang, G., Wang, H., Yu, H., & Zhao, X. (2017). Investigation of enhanced leaching of lithium from α -spodumene using hydrofluoric and sulfuric acid. *Minerals*, 7(11), 205.
- Hayes, E. T., Williams, F. P., & Sternberg, W. M. (1950).
- Howie, R. A., Zussman, J., & Deer, W. (1992). *An introduction to the rock-forming minerals* (p. 696). London, UK: Longman.
- Kotsupalo, N. P., Menzheres, L. T., Ryabtsev, A. D., & Boldyrev, V. V. (2010). Mechanical activation of α -spodumene for further processing into lithium

- compounds. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 44(4), 503-507.
- Lajoie-Leroux, F., Dessemond, C., Soucy, G., Laroche, N., & Magnan, J. F. (2018). Impact of the impurities on lithium extraction from β -spodumene in the sulfuric acid process. *Minerals Engineering*, 129, 1-8.
- Li, C. T., and Peacor, D. R., (1968). The crystal structure of LiAlSi₂O₆-II (β -spodumene). *Zeitschrift Für Kristallographie*, 126(1-3). pp. 46-65. doi:10.1524/zkri.1968.126.1-3.46.
- Linnen, R. L., Van Lichtervelde, M., & Černý, P. (2012). Granitic pegmatites as sources of strategic metals. *Elements*, 8(4), 275-280.
- London, D. (2014). A petrologic assessment of internal zonation in granitic pegmatites. *Lithos*, 184, 74-104.
- Luong, V. T., Kang, D. J., An, J. W., Kim, M. J., & Tran, T. (2013). Factors affecting the extraction of lithium from lepidolite. *Hydrometallurgy*, 134, 54-61.
- Luong, V. T., Kang, D. J., An, J. W., Dao, D. A., Kim, M. J., & Tran, T. (2014). Iron sulphate roasting for extraction of lithium from lepidolite. *Hydrometallurgy*, 141, 8-16.
- Martin, G., Pätzold, C., & Bertau, M. (2017). Integrated process for lithium recovery from zinnwaldite. *International Journal of Mineral Processing*, 160, 8-15.
- Martin, G., Schneider, A., Voigt, W., & Bertau, M. (2017). Lithium extraction from the mineral zinnwaldite: Part II: Lithium carbonate recovery by direct carbonation of sintered zinnwaldite concentrate. *Minerals Engineering*, 110, 75-81.
- Macewan, J. U. (1961). U.S. Patent No. 2,972,517. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Meshram, P., Pandey, B. D., & Mankhand, T. R. (2014). Extraction of lithium from primary and secondary sources by pre-treatment, leaching and separation: A comprehensive review. *Hydrometallurgy*, 150, 192-208.
- Natasha, N. C., Lalasari, L. H., Rohmah, M., & Sudarsono, J. W. (2018). Ekstraksi Litium dari β -Spodumen Hasil Dekomposisi Batuan Sekismika Indonesia Menggunakan Aditif Natrium Sulfat [Lithium Extraction from β -Spodumene the Decomposition Product of Schist Mica Indonesia Using Sodium Sulphate as Additive]. *Metalurgi*, 33(2), 69-78.
- Nicholson, C. M. (1946). Production of lithium compounds. U.S Patent No. 2413644

- Peltosaari, O., Tanskanen, P., Heikkinen, E. P., & Fabritius, T. (2015). $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \beta$ -phase transformation of spodumene with hybrid microwave and conventional furnaces. *Minerals Engineering*, 82, 54-60.
- Rezza, I., Salinas, E., Calvente, V., Benuzzi, D., & Tosetti, M. S. D. (1997). Extraction of lithium from spodumene by bioleaching. *Letters in applied microbiology*, 25(3), 172-176.
- Rezza, I., Salinas, E., Calvente, V., Benuzzi, D., & Tosetti, M. S. D. (1997). Extraction of lithium from spodumene by bioleaching. *Letters in applied microbiology*, 25(3), 172-176.
- Robinson, G. P. (1961). U.S. Patent No. 2,983,576. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Rosales, G. D. (2014). M. d. C. Ruiz, MH Rodriguez. *Hydrometallurgy*, 147, 1-6.
- Rosler, H.J., Lange, H. (1972). *Geochemical Tables*, Ed. Elsevier Publ. Co., 482 pp.
- Salakjani, N. K., Singh, P., & Nikoloski, A. N. (2016). Mineralogical transformations of spodumene concentrate from Greenbushes, Western Australia. Part 1: Conventional heating. *Minerals Engineering*, 98, 71-79.
- Salakjani, N. K., Singh, P., & Nikoloski, A. N. (2020). Production of lithium—A literature review part 1: Pretreatment of spodumene. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 41(5), 335-348.
- Salakjani, N. K., Singh, P., & Nikoloski, A. N. (2019). Acid roasting of spodumene: Microwave vs. conventional heating. *Minerals Engineering*, 138, 161-167.
- Salakjani, N. K., Nikoloski, A. N., & Singh, P. (2017). Mineralogical transformations of spodumene concentrate from Greenbushes, Western Australia. Part 2: Microwave heating. *Minerals Engineering*, 100, 191-199.
- Servicio Geológico Mexicano., (2018)
- Schneider, A., Schmidt, H., Meven, M., Brendler, E., Kirchner, J., Martin, G., ... & Voigt, W. (2017). Lithium extraction from the mineral zinnwaldite: Part I: Effect of thermal treatment on properties and structure of zinnwaldite. *Minerals engineering*, 111, 55-67.
- Schreck, A. E. (1957). Lithium. *Mineral yearbook*, 765–71.
- Sharratt, H. J. (1955). The extraction of lithium from spodumene. MSc Thesis, McGill University, Canada.
- Sharma, Y. (2014). Processing of lithium containing ore. Australian Patent, 2013201833.

- Sharma, Y. (2014a). Processing of lithium containing material. U.S Patent No. 20150152523.
- Siame, E. (2011). Recovery of lithium from China clay waste using a combination of froth flotation, magnetic separation, roasting and leaching.
- Siame, E., & Pascoe, R. D. (2011). Extraction of lithium from micaceous waste from china clay production. *Minerals Engineering*, 24(14), 1595-1602.
- Simmons, W. B., Pezzotta, F., Shigley, J. E., & Beurlen, H. (2012). Granitic pegmatites as sources of colored gemstones. *Elements*, 8(4), 281-287.
- Sitando, O. (2012). Beneficiation of Zimbabwean petalite: Extraction, purification and compound synthesis. MSc Thesis, University of Pretoria, South Africa. doi: 10.1094/PDIS-11-11-0999-PDN
- Sitando, O., & Crouse, P. L. (2012). Processing of a Zimbabwean petalite to obtain lithium carbonate. *International Journal of Mineral Processing*, 102, 45-50.
- Song, Y., Zhao, T., He, L., Zhao, Z., & Liu, X. (2019). A promising approach for directly extracting lithium from α -spodumene by alkaline digestion and precipitation as phosphate. *Hydrometallurgy*, 189, 105141.
- Tran, T., & Luong, V. T. (2015). Lithium production processes. In *Lithium process chemistry* (pp. 81-124). Elsevier.
- Turekian, K. K., & Wedepohl, K. H. (1961). Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geological society of America bulletin*, 72(2), 175-192.
- U.S. Geological Survey (2017). Mineral commodity summaries 2017: U.S. Geological Survey, 202 p., 10.3133/70180197.
- Welsch, A. M., Murawski, D., Prekajski, M., Vulic, P., and Kremenovic, A. (2015). "Ionic conductivity in single-crystal $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$: influence of structure on lithium mobility." *Physics and Chemistry of Minerals*, 42(5). pp. 413–420. doi:10.1007/s00269-015-0732-2.
- White, G. D., & McVay, T. N. (1958). Some aspects of the recovery of lithium from spodumene (No. ORNL-2450). Oak Ridge National Lab., Tenn.
- Qun-xuan, Y. A. N., Xin-hai, L. I., Zhi-xing, W. A. N. G., Xi-fei, W. U., Hua-jun, G. U. O., Qi-yang, H. U., ... & Jie-xi, W. A. N. G. (2012). Extraction of valuable metals from lepidolite [J]. *Hydrometallurgy*, 117, 116-118.
- Yan, Q., Li, X., Wang, Z., Wu, X., Wang, J., Guo, H., ... & Peng, W. (2012). Extraction of lithium from lepidolite by sulfation roasting and water leaching. *International Journal of Mineral Processing*, 110, 1-5.

Zelikman, A. N., Krein, O. E., & Sansonov, G. V. (1966). Metallurgy of Rare Metals (translated from Russian). Washington, DC: NASA and National Science Foundation, pp. 458.

Alternativas para combatir las infecciones nosocomiales asociadas a catéteres utilizando extractos naturales y tecnología del plasma.

Alternatives to combat catheter-associated nosocomial infections using natural extracts and plasma technology.

Emilian Martínez Moreno ¹, Rosa Idalia Narro Céspedes ^{1*}, Francisco Javier Alonso Montemayor ¹, Nancy Verónica Pérez Aguilar ¹, Yadira Karina Reyes Acosta ¹.

¹ Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, José Cárdenas Valdés S/N Col. República C.P 25280, Saltillo Coahuila México

***Rosa Idalia Narro Céspedes
Universidad Autónoma de Coahuila
rinarro@uadec.edu.mx**

Resumen

Las infecciones bacterianas asociadas a catéteres son un problema nosocomial común. La incidencia y la resistencia de las bacterias ESKAPE en este tipo de infecciones, motiva la búsqueda de alternativas con el propósito de sustituir el uso de antibióticos y disminuir las infecciones. En este sentido el tratamiento superficial mediante plasma es una estrategia efectiva para mejorar la adherencia de recubrimientos antibacterianos. Por otro lado, el conocimiento de las propiedades antibacterianas de los extractos herbales, hace de estos una alternativa prometedora a considerar. En este artículo se plasman estas alternativas con resultados positivos, con el fin de señalar la importancia de la investigación de nuevas técnicas y del desarrollo de las herramientas conocidas para prevenir la colonización bacteriana de biomateriales como los catéteres, por parte de bacterias resistentes a los antibióticos.

Palabras clave: Tratamiento de plasma, Bacterias ESKAPE, Extracto de planta, Cubiertas, Catéteres, Recubrimientos antibacterianos.

Abstract

Catheter-associated bacterial infections are a common nosocomial problem. The incidence and resistance of ESKAPE bacteria in this type of infections, motivates the search for alternatives with the purpose of substituting the use of antibiotics and reducing infections. In this sense, surface treatment with plasma is an effective strategy to improve the adherence of antibacterial coatings. On the other hand, the knowledge of the antibacterial properties of herbal extracts makes them a promising alternative to consider. This article presents these alternatives with positive results, in order to point out the importance of research into new techniques and the development of known tools to prevent bacterial colonization of biomaterials such as catheters by antibiotic-resistant bacteria.

Keywords: Plasma treatment, ESKAPE bacteria, Plant extract, Coat, Catheters, Antibacterial coatings

Introducción

Las infecciones nosocomiales suelen prolongar el tiempo de hospitalización, lo cual produce pérdidas económicas (Li y col., 2017). Anualmente, las pérdidas son de alrededor 4,500 millones de dólares, mientras que el número de decesos asciende hasta 88,000 (Izadi y col., 2020). Tan solo en Norteamérica y Europa entre el 5 y 10% del total de las hospitalizaciones resultan en infecciones nosocomiales, mientras que, en Latinoamérica, Arabia Saudita, África subsahariana y Asia, esta cifra asciende hasta el 40% (Khan y col., 2015). Alrededor del 26% de las infecciones nosocomiales están asociadas con el uso de catéteres venosos (CLABSI), urinarios (CAUTI) y de ventiladores pulmonares (VAP) (Izadi y col., 2020). Las CAUTI se presentan durante el tiempo que permanece implantado el catéter y pueden aparecer después de 48 horas de uso continuo. (Al-Ansari y col., 2020; Khahakaew y col., 2021; Zhong y col., 2020).

Las bacterias ESKAPE (*Enterococcus faecium*, *Staphylococcus aureus*, *Klebsiella pneumoniae*, *Acitenobacter baumannii*, *Pseudomonas aeruginosa*, y *Enterobacter spp.*), son las principales causantes de infecciones nosocomiales y su resistencia es la causa de miles de muertes anuales, pues además de poseer mecanismos que inhiben la acción de los antibióticos, pueden formar biopelículas que les brindan una mayor resistencia (**Ver Tabla 1**) (Havlikova y col., 2021; Narayana y col., 2019). Estas bacterias son capaces de desarrollarse aun en presencia de los medicamentos antibióticos por lo que la resistencia bacteriana se ha catalogado como una emergencia global (Yadav & Kapley, 2021; Yakimov y col., 2021).

Tabla 1. Tabla de bacterias ESKAPE, su tipo de tinción y antibióticos a los que resiste

Bacteria	Tipo de bacteria (Gram + o -)	Resistente a
<i>Enterococcus faecium</i>	+	Penicilina, vancomicina

<i>Staphylococcus aureus</i>	+	Meticilina , vancomicina
<i>Klebsiella pneumoniae</i>	-	Carbapenémicos
<i>Acitenobacter baumannii</i>	-	BLEE, carbapenémicos
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	-	Fluoroquinolonas, carbapenémicos
<i>Enterobacter spp</i>	-	Antimicrobianos BLEE, carbapenémicos

Dado a que estas bacterias exhiben una tendencia para adquirir resistencia a los agentes antibacterianos comunes, la investigación de nuevas alternativas para combatir las enfermedades infecciosas ha ido a la alza (Streicher, 2021). La búsqueda de sustancias de origen vegetal con propiedades antifúngicas y antibacterianas y su aislamiento, ha permitido identificar fuentes con alto potencial para obtener nuevos compuestos antimicrobianos, tanto así que la Organización Mundial de la Salud ha declarado que esta es la mejor fuente para obtener nuevos compuestos antibacterianos (Hemeg et al., 2020; Manandhar et al., 2019) . Por otro lado, el tratamiento con plasma es una de las formas más efectivas de modificar y mejorar la superficie del material sin llevar a cabo procedimientos contaminantes y agresivos de injerto químico, ya que los grupos funcionales y radicales libres que se pueden formar en la superficie tratada aumentan la energía superficial mejorando el rendimiento del recubrimiento posterior y la fuerza de adhesión (**Ver Figura 1**), siendo esta una tecnología aplicada ampliamente en la modificación superficial y en la implementación de cubiertas en dispositivos médicos (Wen y Lin, 2021). Conociendo esto, esta revisión analiza la pertinencia para la resolución de infecciones nosocomiales mediante dos alternativas: la tecnología del plasma y el uso de extractos naturales, las cuales juntas podrían presentar un efecto sinérgico para el tratamiento y la inhibición bacteriana, las principales causantes de complicaciones e infecciones asociadas a catéteres.

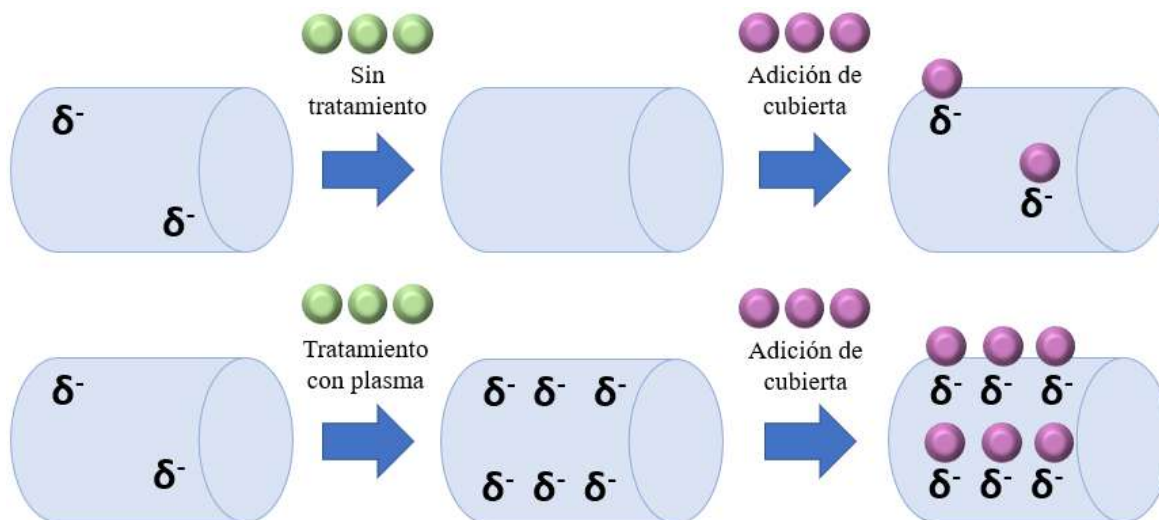


Figura 1. Esquema de funcionalización de superficies mediante plasma.
Fuente: *Elaboración propia.*

Extractos herbales como alternativa antimicrobiana

Plantas de distintas regiones del mundo pueden actuar como bactericidas o inhibidores de crecimiento bacteriano, dado esto, se han realizado diversas investigaciones a lo largo del mundo probando una variedad de plantas en contra de bacterias clínicamente importantes. Por ejemplo, el extracto de la planta comúnmente conocida como “vieira lavanda” (*K. fedtschenkoi*), presenta actividad antimicrobiana contra tres bacterias del grupo ESKAPE *S. aureus*, *A. baumannii*, y *P. aeruginosa*. Se han reportado concentraciones inhibitorias que oscilan entre 128-256 $\mu\text{g/ml}$ (Richwagen y col., 2019). La medicina tradicional y el uso de plantas como agente terapéutico se ha desarrollado a lo largo de la historia por todo el mundo (Castronovo y col., 2021), tal es el caso de Panda y colaboradores en 2019, quienes reportaron una variedad extractos naturales de plantas medicinales originarias de India, entre las que destacan la bischofia (*Bischofia javanica*), hojas del árbol trema oriental (*Trema orientalis*), olivo de ceilan (*Elaeocarpus serratus*) y *Pterygota alata*. Los extractos se obtuvieron con disolventes como el agua, etanol,

hexano y acetona, siendo capaces de inhibir a la gran mayoría de cepas de *S. aureus* multirresistente probadas en el experimento (Panda y col., 2020).

En regiones del continente americano, se ha estudiado a la planta del achiote (*Bixa orellana*), originaria del sur de América y México, probando extractos obtenidos de tallos, hojas y semillas de esta planta, siendo estas capaces de inhibir el crecimiento de *E. coli* y *Bacillus subtilis* (Ahmed y col., 2020). Por otro lado, la flor de Jamaica (*Hibiscus sabdariffa*) también posee actividad antimicrobiana de acuerdo con Portillo-Torres y col., en el 2019, quienes encontraron que los componentes fenólicos y ácidos orgánicos presentes, pueden inhibir distintas cepas de *Salmonella spp.* y *E. coli*, además, señalan que estas bacterias presentaron resistencia con al menos 10 antibióticos (Portillo-Torres y col., 2019). Otra planta que se ha estudiado en diversas ocasiones es la granada (*Punica granatum*). Los autores demostraron una buena efectividad para atacar bacterias como *E. coli*, *S. aureus* y *Bacillus subtilis* y además de ser también efectiva contra *S. aureus* resistente a meticilina (MRSA), al igual que la planta de jaguarzo morisco (*Cistus salviifolius*) (Álvarez-Martínez, Rodríguez, y col., 2021; Chithra y col., 2021).

Pallah y colaboradores realizaron una investigación profunda en la búsqueda de contrarrestar a bacterias oportunistas y multirresistentes del grupo ESKAPE, donde analizaron extractos metanólicos de distintas plantas como la grosella roja (*Ribes rubrum*), cereza (*Prunus avium*), ciruela (*Prunus domestica*), grosella josta (*Ribes x nidigrolaria*), bayas azules (*Vaccinium myrtillus*) y la ciruela de cereza (*Prunus cerasifera*). Obtuvieron los extractos mediante un tratamiento de metanol y evaporación al vacío y probándolas contra las bacterias *E. faecium*, *S. aureus*, *K. pneumoniae*, *A. baumannii*, *P. aeruginosa*, *Enterobacter spp.* Los resultados reportados señalan principalmente la actividad de *Prunus cerasifera* en contra de *K. pneumoniae*, *Enterococcus cloacae*, *P. aeruginosa*, *S. aureus*, mientras que el extracto de *Prunus avium* solo mostró actividad contra *E. cloacae* y *S. aureus*. El extracto de ciruela presentó efecto antagonista contra crecimiento de *S. aureus*, *E.*

cloacae, *K. pneumoniae*, los demás extractos demostraron una baja afinidad antibacteriana (Pallah y col., 2020).

Así mismo, según reportaron Sah y colaboradores en el 2020, una planta que ha demostrado que su extracto posee una actividad antibacteriana es la planta asiática originaria de India *Andrographis paniculata*, comúnmente llamada en su región como “maha-tita”. El extracto etanólico de esta planta fue probada en contra de cepas multirresistentes de *K. pneumoniae* y demostró capacidad de inhibir el crecimiento bacteriano a concentraciones entre 250-500 µg/mL (Sah y col., 2020). De la misma manera se ha reportado que el nogal (*Junglans regia L*) posee componentes capaces de inhibir el crecimiento de bacterias clínicamente importantes. Dolatabadi y colaboradores en el 2018 probaron extractos de esta planta utilizando disolventes como el agua y el etanol probándolos en contra de la bacteria *Pseudomonas aeruginosa*. Siendo capaces ambos extractos de inhibir el crecimiento bacteriano (Dolatabadi y col., 2018).

Además de reducir el uso de antibióticos, el uso de extractos naturales también permitirá combatir la resistencia bacteriana. La búsqueda y desarrollo de nuevos antimicrobianos de origen herbal, debe incluir plantas medicinales, y plantas comestibles, ya que los extractos representan una solución y tendencia muy prometedora (Pallah y col., 2020).

Plasma como herramienta para obtención de catéteres antibacterianos

El estudio para la obtención de catéteres antibacterianos se ha estado desarrollando, esto debido a que principalmente la presencia de los catéteres en el cuerpo humano brinda acceso libre a las bacterias del entorno y permite la colonización de los diversos espacios ocupados por los dispositivos médicos. Estos espacios pueden ser por ejemplo el tracto urinario debido al uso de estos dispositivos. Una de las técnicas empleadas para combatir esta problemática es la implementación de cubiertas utilizando antibióticos, cubiertas fabricadas con

compuestos de plata, así como el desarrollo de materiales antiadherentes (Zhang y col., 2019). También se han realizado cubiertas con una gran variedad de materiales de distinta naturaleza tales como cubiertas de hidroxiapatita antibiótica o cubiertas de ácido hialurónico, el desarrollo de polímeros fotoactivos y cubiertas antisépticas (Khatoon y col., 2018). Aun así, la disponibilidad de estos catéteres es pobre y los existentes son de eficacia controlada o baja, como el catéter cubierto de plata que muestra efectividad en los primeros días, mientras que a la primera semana pierde efectividad (Zhang y col., 2019).

El uso del tratamiento con plasma en aplicaciones biomédicas data desde finales del siglo XX. Estas investigaciones buscan la biocompatibilidad de las superficies poliméricas con la sangre así como los tejidos, además de jugar un papel importante en el estudio de la liberación de fármacos, por lo que se le considera una tecnología relativamente nueva (Singh y col., 2019). Así mismo ha significado un avance en la ciencia y tecnología de superficies aplicadas, ya que permite la funcionalización de cualquier superficie, inmovilización de moléculas bioactivas y adición de capas orgánicas biofuncionales, proveyéndole de características hidrofóbicas, hidrofílicas, modificación de adhesión celular o características antiincrustantes, todo esto sin afectar sus rasgos inherentes (Yang y col., 2020). El tratamiento con plasma consta en aplicar un estímulo energético a través de un electrodo separado del ambiente mediante una barrera conteniendo el gas; cuando el gas con el cual se trabaja fluye a través del electrodo, se ioniza y forma una descarga que se propaga a través del contenedor hasta que la energía se disipa. El plasma que se produce de esta manera se conoce como plasma frío, por lo que el entorno del mismo se mantiene a baja temperatura mediante la adición de una barrera dieléctrica alrededor del electrodo de potencia (Alonso-Montemayor y col., 2021).

Dentro de la investigación, con esta tecnología se han desarrollado distintas cubiertas, una consiste en la cubierta de silano de amonio cuaternario, que mostró un efecto antibacteriano contra *E. coli*. Este experimento consistió en la modificación

del catéter mediante tratamientos de plasma de argón para la activación de la superficie creando radicales libres, seguido de esto, en un tratamiento distinto se hizo una polimerización con ácido acrílico injertando grupos carboxílicos en el catéter de poliuretano, para que posteriormente estos grupos funcionales añadidos funcionaran como ancla para la adsorción de las moléculas positivas del silano de amonio cuaternario que se añadieron mediante inmersión en una solución de cloruro de dimetiloctadecil[3-(trimetoxisilil)propil]amonio. Los fragmentos del catéter modificados, presentaron actividad antibacteriana, registrando inhibición del 99% hasta el 100% en algunos tratamientos empleados (Zanini y col., 2015).

Se ha reportado que el tratamiento mediante plasma por sí solo puede añadir un efecto antibacteriano a una superficie. La aparición de grupos -OH y C=O, cambian las propiedades de la superficie del catéter, así como también el cambio de tamaño de poro (erosión) de la superficie, pueden desfavorecer el anclaje de las bacterias en los catéteres como lo reporta Zarrini y colaboradores en el 2016, quienes reportan la modificación de un catéter urinario a través de plasma de nitrógeno y evalúan su actividad antibacteriana en la formación de biofilms de la bacteria *S. epidermidis*. Demostraron que este tratamiento inhibió al menos el 54% de la formación de biopelículas con solo tratar el catéter mediante plasma de nitrógeno (Zarrini y col., 2016).

La polimerización y activación mediante plasma han obtenido resultados favorables en recubrimientos de catéteres. El anclaje de una cubierta de melimina mediante activación por implementación de iones con plasma de nitrógeno, en un catéter de policloruro de vinilo demostró acción antibacteriana y un buen anclaje según detallan Tran y colaboradores en 2019. El anclaje de una cubierta se puede presentar por distintas interacciones no covalentes y en otros casos covalentes, gracias a la formación de radicales libres o implementación de grupos capaces de generar interacciones con un compuesto (Tran y col., 2019). La investigación de polímeros y su modificación superficial para un potencial uso en dispositivos

médicos, está siendo un área de gran interés en la actualidad, y su desarrollo representa un avance en el área médica. Se han reportado resultados muy favorables de una superficie de polidimetilsiloxano (PDMS) modificado mediante plasma de argón y cubierta de un antiséptico popular como la clorhexidina (CHX). Los resultados de inhibición para *E. coli* mostraron ser una alternativa favorable y que se puede considerar para su utilización en investigaciones y cubiertas futuras (Mora-Boza y col., 2019).

Distintos materiales, elementos y compuestos poseen actividad antibacteriana, al ser utilizados en conjunto, esta propiedad puede ser potenciada e incrementada, así como también añadir estabilidad a esa combinación específica para emplearla en superficies de interés. Por ejemplo el uso de nanopartículas y óxidos de zinc han demostrado una actividad antimicrobiana prometedora (Perveen y col., 2020), tal es el caso que de un compuesto formado por óxido de zinc y palygorskita anclado a una superficie de un catéter funcionalizado mediante plasma. La funcionalización consistió en añadir grupos -OH permitiendo la interacción de los compuestos de ZnO y palygorskita en la superficie polimérica, se obtuvo así un catéter con propiedades antibacterianas, que mostró actividad contra bacterias como *E. coli* y *S. aureus* durante 5 y 7 días para los distintos tipos de cubiertas ancladas (Jing y col., 2020). En la **Tabla 2** se muestra un resumen de los distintos catéteres y extractos de plantas mencionados en esta revisión bibliográfica.

Tabla 2. Resumen de extractos y modificaciones a catéteres presentadas en esta revisión

Catéteres				
Material	Plasma	Cubierta	Bacterias probadas	Referencia

Catéter de Poliuretano	Argón	Silano de amonio cuaternario	<i>E. coli</i>	Zanini y col., 2015
Catéter urinario*	Nitrógeno	Tratamiento superficial	<i>S. epidermidis</i>	Zarrini y col., 2016
Catéter de PVC	Nitrógeno	Melimina	<i>S. aureus</i>	Tran y col., 2019
Catéter de PDMS	Argón	Clorhexidina	<i>E. coli</i>	Mora-Boza y col., 2019
Catéter urinario tipo Foley**	Oxígeno	Zn(OH) ₂ Palygorskita+[Zn(OH) ₂]	<i>E. coli</i> <i>S. aureus</i>	Jing y col., 2020
Extractos				
Planta	Bacterias probadas		Referencia	
<i>K. fedtschenkoi</i>	<i>S. aureus, A. baumannii, P. aeruginosa</i>		Richwagen y col., 2019	
Variedad de especies de la india	<i>S. aureus</i>		Panda y col., 2019	
<i>Hibiscus sabdariffa</i>	<i>Salmonella spp, E. coli</i>		Portillo-Torrez y col., 2019	
<i>Bixa orellana</i> L	<i>E. coli, B. subtilis</i>		Ahmed y col., 2020	
<i>Punica granatum</i>	<i>E. coli, S. aureus</i>		Chithra y col., 2021	
<i>Punica granatum, Cistus salviifolius</i>	<i>S. aureus</i>		Álvarez-Martínez y col., 2021	

<i>Prunus cerasifera</i>	<i>K. pneumoniae, Enterococcus cloacae, P. aeruginosa, S. aureus</i>	Pallah y col., 2020
<i>Prunus avium</i>	<i>E. cloacae</i> y <i>S. aureus</i> .	Pallah y col., 2020
<i>Prunus domestica</i>	<i>S. aureus, E. cloacae, K. pneumoniae</i>	Pallah y col., 2020
<i>Andrographis paniculata</i>	<i>K. pneumoniae</i>	Sah y col., 2020
<i>Juglans regia</i> L	<i>P. aeruginosa</i>	Dolatabadi y col., 2018

Una posible solución en estas alternativas

Los polímeros tienen un amplio espectro de utilidad, en el área de la ciencia se encuentra el campo del área biomédica en donde se diseñan diversos dispositivos médicos y material de ingeniería de tejidos. El principal objetivo de estos materiales es la interacción con medios químicamente distintos, entre ellos medios orgánicos (Mrsic y col., 2021). Muchos polímeros son inertes y poseen una baja energía superficial, se adhieren mal a los revestimientos provocando incrustaciones y malestar, y así mismo infecciones debido a la formación de biopelículas, por lo que muchas investigaciones se enfocan en la modificación de superficies con tratamientos que desfavorezcan la adhesión celular o bien, cubiertas antimicrobianas (Learn y col., 2021).

La versatilidad del plasma y las ventajas que presenta en el área de modificación superficial hacen de esta tecnología una de las principales herramientas en este campo. El plasma consiste en una mezcla de radicales libres, electrones y partículas con las cuales se pueden llevar procedimientos como limpieza, erosión, creación de sitios activos y polimerización de superficies (**Ver Figura 2**), en donde el tipo de gas de alimentación, la temperatura, el tiempo, la potencia, la frecuencia y las

distancias de separación entre el sustrato polimérico y el contacto con plasma, así como la geometría del reactor juegan un papel importante en los resultados (Dawood, 2021; Singh y col., 2019).

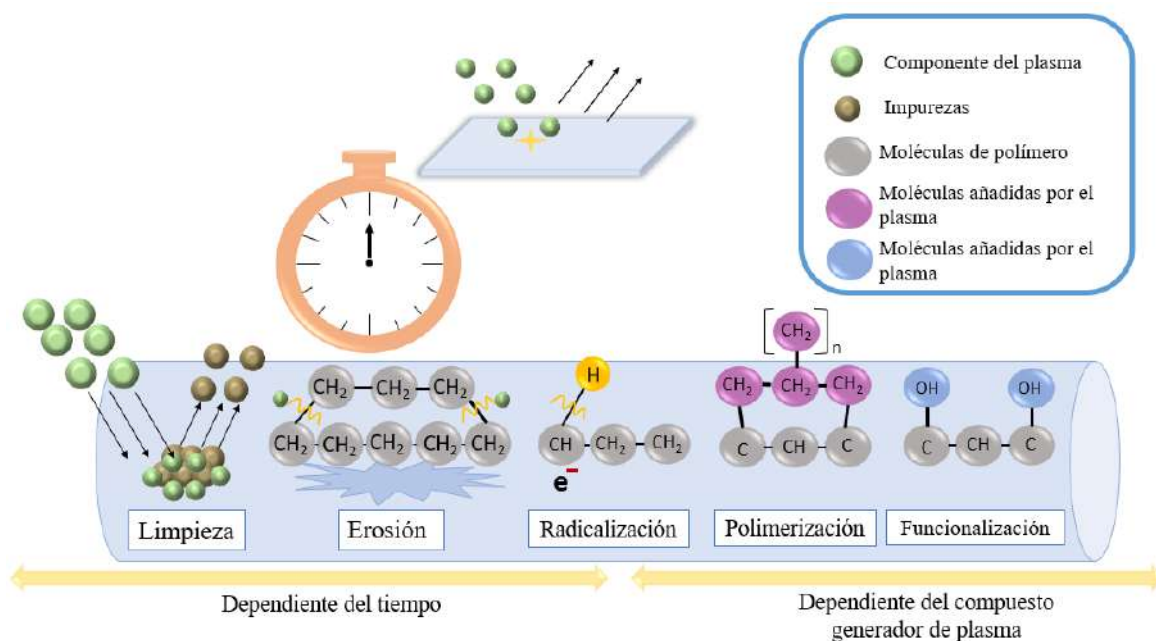


Figura 2. Tratamiento y función del plasma en una superficie. La influencia del tiempo de tratado puede generar limpieza, formar radicales o formación de grabado alterando la superficie.

Fuente: *Elaboración propia.*

Por otro lado una gran variedad de plantas ha sido considerada como fuentes naturales de compuestos antimicrobianos capaces de ser utilizados como tratamientos para las infecciones que constantemente atacan al humano (Manandhar y col., 2019). El efecto antimicrobiano de las plantas es atribuido principalmente a un gran número de compuestos fenólicos, alcohólicos y terpenoides, compuestos que se encuentran presentes en diferentes partes de las plantas como tallos, hojas, flores, semillas y frutos (Boy y col., 2021; El-Baz y col., 2021).

La manera en que actúan estos compuestos orgánicos para la inhibición de su crecimiento está relacionada con una gran variedad de procesos y mecanismos

bacterianos. Algunos extractos naturales se basan en la inhibición de la síntesis de proteínas, mientras que otros su punto de acción se concentra en la inhibición de rutas metabólicas. Se han reportado variedad de mecanismos que se basan en el deterioro y permeabilidad de la pared celular y membrana plasmática bacteriana provocando lisis celular al entrar en contacto con estos compuestos, además de la interferencia de la replicación del ADN y síntesis de ARN (Álvarez-Martínez, Barrajón-Catalán, y col., 2021).

La posibilidad de combinar la tecnología del plasma con los extractos en la creación de catéteres antimicrobianos parece ser una prometedora alternativa que se le puede sumar a estas dos. Se ha reportado recientemente del efecto de sinergia que se presenta al tratar con plasma a los extractos naturales debido a las especies reactivas de oxígeno y nitrógeno presentes en el plasma que se injertan, y además junto con la radiación ultravioleta generada por el plasma modifican las moléculas del extracto aumentando el contenido fenólico (Alonso-Montemayor y col., 2021). La capacidad del plasma y la eficacia dentro de la modificación superficial, la resistencia bacteriana y la producción de extractos naturales capaces de combatir a las bacterias resistentes, ponen en mira la investigación de estas dos alternativas en conjunto para la implementación de catéteres antimicrobianos, que brinden la oportunidad de combatir a las infecciones asociadas a los catéteres,

Conclusión

El potencial que ofrecen estas alternativas por si solas es prometedor dentro del área de la salud, el avance que se presenta en la resistencia bacteriana y la alta incidencia en infecciones nosocomiales obliga a buscar de igual manera mecanismos y tecnologías para contrarrestar dicho problema. Se ha reportado de la baja disponibilidad de catéteres antimicrobianos en el mercado, y se conoce que la efectividad de los disponibles es cuestionable aun, o bien de poca duración.

El conocimiento que se tiene en la actualidad sobre la combinación de la tecnología del plasma y extractos naturales en la formación de cubiertas antimicrobianas en catéteres aun es escaso, puesto que se han encontrado pocos reportes, casi nulos, aun sabiendo del potencial que los extractos naturales poseen en la inhibición bacteriana. Por lo tanto, la investigación a futuro de esta área podría contribuir de manera importante para el combate de las infecciones asociadas a catéteres.

Agradecimientos

Como alumno de la Maestría en Ciencia y Tecnología Química (MaCTeQ) de la Universidad Autónoma de Coahuila (UA de C), se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACyT) por la beca 788155 brindada. Se agradece también al COECYT y al Gobierno del Estado de Coahuila por el financiamiento por medio del fondo FONCYT del proyecto COAH-2020-C14-058.

Referencias bibliográficas

Artículos científicos:

Ahmed, S., Moni, B. M., Ahmed, S., Gomes, D. J., & Shohael, A. M. (2020). Comparative phytochemical, antioxidant, and antibacterial study of different parts of Doigota plants (*Bixa orellana* L.). *Bulletin of the National Research Centre*, 44(1), 1–10. <https://doi.org/10.1186/s42269-020-00349-1>

Al-Ansari, M. M., Dhasarathan, P., Ranjitsingh, A. J. A., & Al-Humaid, L. A. (2020).

Ganoderma lucidum inspired silver nanoparticles and its biomedical applications with special reference to drug resistant Escherichia coli isolates from CAUTI. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 27(11), 2993–3002. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.09.008>

Alonso-Montemayor, F. J., Reyna-Martínez, R., Neira-Velázquez, M. G., Sáenz-Galindo, A., Aguilar, C. N., & Narro-Céspedes, R. I. (2021). A review on antibacterial and therapeutic plasma-enhanced activities of natural extracts. *Journal of King Saud University - Science*, 33(6), 101513. <https://doi.org/10.1016/J.JKSUS.2021.101513>

Álvarez-Martínez, F. J., Barraji n-Catalán, E., Herranz-López, M., & Micol, V. (2021). Antibacterial plant compounds, extracts and essential oils: An updated review on their effects and putative mechanisms of action. *Phytomedicine*, 90, 153626. <https://doi.org/10.1016/J.PHYMED.2021.153626>

Álvarez-Martínez, F. J., Rodríguez, J. C., Borr s-Rocher, F., Barraji n-Catalán, E., & Micol, V. (2021). The antimicrobial capacity of Cistus salviifolius and Punica granatum plant extracts against clinical pathogens is related to their polyphenolic composition. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80003-y>

Boy, F. R., Casquete, R., Martínez, A., Córdoba, M. G., Ruíz-Moyano, S., & Benito, M. J. (2021). Antioxidant, antihypertensive and antimicrobial properties of phenolic compounds obtained from native plants by different extraction methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(5), 1–12. <https://doi.org/10.3390/ijerph18052475>

Castronovo, L. M., Vassallo, A., Mengoni, A., Miceli, E., Bogani, P., Firenzuoli, F., Fani, R., & Maggini, V. (2021). Medicinal plants and their bacterial microbiota: A review on antimicrobial compounds production for plant and human health. *Pathogens*, 10(2), 1–17. <https://doi.org/10.3390/pathogens10020106>

- Chithra, A., Dharanyshri, R., Das, A., & Bindhu, J. (2021). Structural and antimicrobial analysis of methanolic extract of punica granatum peel. *International Journal of Current Research and Review*, 13(3), 175–184. <https://doi.org/10.31782/IJCRR.2021.13332>
- Dawood, N. (2021). Surface modification of date palm leaves by cold plasma treatment. *Journal of King Saud University - Science*, 33(5), 101465. <https://doi.org/10.1016/J.JKSUS.2021.101465>
- Dolatabadi, S., Moghadam, H. N., & Mahdavi-Ourtakand, M. (2018). Evaluating the anti-biofilm and antibacterial effects of Juglans regia L. extracts against clinical isolates of Pseudomonas aeruginosa. *Microbial Pathogenesis*, 118, 285–289. <https://doi.org/10.1016/J.MICPATH.2018.03.055>
- El-Baz, A. M., Mosbah, R. A., Goda, R. M., Mansour, B., Sultana, T., Dahms, T. E. S., & El-Ganiny, A. M. (2021). Back to nature: Combating candida albicans biofilm, phospholipase and hemolysin using plant essential oils. *Antibiotics*, 10(1), 1–18. <https://doi.org/10.3390/antibiotics10010081>
- Havlikova, J., May, R. C., Styles, I. B., & Cooper, H. J. (2021). Liquid Extraction Surface Analysis Mass Spectrometry of ESKAPE Pathogens. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 52, 33. <https://doi.org/10.1021/jasms.0c00466>
- Hemeg, H. A., Moussa, I. M., Ibrahim, S., Dawoud, T. M., Alhaji, J. H., Mubarak, A. S., Kabli, S. A., Alsubki, R. A., Tawfik, A. M., & Marouf, S. A. (2020). Antimicrobial effect of different herbal plant extracts against different microbial population. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 27(12), 3221–3227. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.08.015>
- Izadi, N., Eshrati, B., Etemad, K., Mehrabi, Y., & Hashemi-Nazari, S. S. (2020). Rate of the incidence of hospital-acquired infections in Iran based on the data

- of the national nosocomial infections surveillance. *New Microbes and New Infections*, 38, 100768. <https://doi.org/10.1016/j.nmni.2020.100768>
- Jing, Y., Mu, B., Zhang, M., Wang, L., Zhong, H., Liu, X., & Wang, A. (2020). Zinc-loaded palygorskite nanocomposites for catheter coating with excellent antibacterial and anti-biofilm properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 600, 124965. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124965>
- Khahakaew, S., Suwanpimolkul, G., Wongkeskij, T., Punakabutra, N., & Suankratay, C. (2021). A Comparison of Periurethral Cleaning between Normal Saline and Savlon Solutions before Indwelling Urinary Catheterization in Reducing Catheter-Associated Bacteriuria: A Randomized Controlled Study. *International Journal of Infectious Diseases*, 105, 702–708. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2021.02.086>
- Khan, H. A., Ahmad, A., & Mehboob, R. (2015). Nosocomial infections and their control strategies. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 5(7), 509–514. <https://doi.org/10.1016/j.apjtb.2015.05.001>
- Khaton, Z., McTiernan, C. D., Suuronen, E. J., Mah, T. F., & Alarcon, E. I. (2018). Bacterial biofilm formation on implantable devices and approaches to its treatment and prevention. *Heliyon*, 4(12), e01067. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e01067>
- Learn, G. D., Lai, E. J., Wilson, E. J., & von Recum, H. A. (2021). Nonthermal plasma treatment of polymers modulates biological fouling but can cause material embrittlement. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 113, 104126. <https://doi.org/10.1016/J.JMBBM.2020.104126>
- Li, Y., Gong, Z., Lu, Y., Hu, G., Cai, R., & Chen, Z. (2017). Impact of nosocomial infections surveillance on nosocomial infection rates: A systematic review. *En*

International Journal of Surgery (Vol. 42, pp. 164–169). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.ijssu.2017.04.065>

Manandhar, S., Luitel, S., & Dahal, R. K. (2019). In Vitro Antimicrobial Activity of Some Medicinal Plants against Human Pathogenic Bacteria. *Journal of Tropical Medicine*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/1895340>

Mora-Boza, A., Aparicio, F. J., Alcaire, M., López-Santos, C., Espinós, J. P., Torres-Lagares, D., Borrás, A., & Barranco, A. (2019). Multifunctional antimicrobial chlorhexidine polymers by remote plasma assisted vacuum deposition. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 13(2), 330–339. <https://doi.org/10.1007/s11705-019-1803-6>

Mrsic, I., Bäuerle, T., Ulitzsch, S., Lorenz, G., Rebner, K., Kandelbauer, A., & Chassé, T. (2021). Oxygen plasma surface treatment of polymer films—Pellethane 55DE and EPR-g-VTMS. *Applied Surface Science*, 536, 147782. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2020.147782>

Narayana, J. L., Mishra, B., Lushnikova, T., Golla, R. M., & Wang, G. (2019). Modulation of antimicrobial potency of human cathelicidin peptides against the ESKAPE pathogens and in vivo efficacy in a murine catheter-associated biofilm model. *Biochimica et Biophysica Acta - Biomembranes*, 1861(9), 1592–1602. <https://doi.org/10.1016/j.bbamem.2019.07.012>

Pallah, O., Meleshko, T., Tymoshchuk, S., Yusko, L., & Bugyna, L. (2020). How to escape “the escape pathogens” using plant extracts. *ScienceRise: Biological Science*, 0(5-6(20-21)), 30–37. <https://doi.org/10.15587/2519-8025.2019.193155>

Panda, S. K., Das, R., Lavigne, R., & Luyten, W. (2020). Indian medicinal plant extracts to control multidrug-resistant *S. aureus*, including in biofilms. *South African Journal of Botany*, 128, 283–291.

<https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.11.019>

- Perveen, R., Shujaat, S., Qureshi, Z., Nawaz, S., Khan, M. I., & Iqbal, M. (2020). Green versus sol-gel synthesis of ZnO nanoparticles and antimicrobial activity evaluation against panel of pathogens. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), 7817–7827. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.004>
- Portillo-Torres, L. A., Bernardino-Nicanor, A., Gómez-Aldapa, C. A., González-Montiel, S., Rangel-Vargas, E., Villagómez-Ibarra, J. R., González-Cruz, L., Cortés-López, H., & Castro-Rosas, J. (2019). Hibiscus acid and chromatographic fractions from Hibiscus sabdariffa calyces: Antimicrobial activity against multidrug-resistant pathogenic bacteria. *Antibiotics*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/antibiotics8040218>
- Richwagen, N., Lyles, J. T., Dale, B. L. F., & Quave, C. L. (2019). Antibacterial Activity of Kalanchoe mortagei and K. Fedtschenkoi Against ESKAPE Pathogens. *Frontiers in Pharmacology*, 10(FEB), 67. <https://doi.org/10.3389/fphar.2019.00067>
- Sah, S. K., Rasool, U., & Hemalatha, S. (2020). Andrographis paniculata extract inhibit growth, biofilm formation in multidrug resistant strains of Klebsiella pneumoniae. *Journal of Traditional and Complementary Medicine*, 10(6), 599–604. <https://doi.org/10.1016/J.JTCME.2019.02.006>
- Singh, S., Prakash, C., Wang, H., Yu, X. feng, & Ramakrishna, S. (2019). Plasma treatment of polyether-ether-ketone: A means of obtaining desirable biomedical characteristics. *European Polymer Journal*, 118, 561–577. <https://doi.org/10.1016/J.EURPOLYMJ.2019.06.030>
- Streicher, L. M. (2021). Exploring the future of infectious disease treatment in a post-antibiotic era: A comparative review of alternative therapeutics. *Journal of Global Antimicrobial Resistance*, 24, 285–295.

<https://doi.org/10.1016/j.jgar.2020.12.025>

Tran, C., Yasir, M., Dutta, D., Eswaramoorthy, N., Suchowerska, N., Willcox, M., & McKenzie, D. R. (2019). Single Step Plasma Process for Covalent Binding of Antimicrobial Peptides on Catheters to Suppress Bacterial Adhesion. *ACS Applied Bio Materials*, 2(12), 5739–5748.

<https://doi.org/10.1021/acsabm.9b00776>

Wen, C. M., & Lin, C. H. (2021). Tube-Based DBD Plasma Treatment for Improving the Performance of the Slippery Coating Layers on Medical Catheters. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 49(1), 162–167.

<https://doi.org/10.1109/TPS.2020.3009409>

Yadav, S., & Kapley, A. (2021). Antibiotic resistance: Global health crisis and metagenomics. *Biotechnology Reports*, 29, e00604.

<https://doi.org/10.1016/j.btre.2021.e00604>

Yakimov, A., Bakhlanova, I., & Baitin, D. (2021). Targeting evolution of antibiotic resistance by SOS response inhibition. En *Computational and Structural Biotechnology Journal* (Vol. 19, pp. 777–783). Elsevier B.V.

<https://doi.org/10.1016/j.csbj.2021.01.003>

Yang, T., Du, Z., Qiu, H., Gao, P., Zhao, X., Wang, H., Tu, Q., Xiong, K., Huang, N., & Yang, Z. (2020). From surface to bulk modification: Plasma polymerization of amine-bearing coating by synergic strategy of biomolecule grafting and nitric oxide loading. *Bioactive Materials*, 5(1), 17–25.

<https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2019.12.006>

Zanini, S., Polissi, A., Maccagni, E. A., Dell’Orto, E. C., Liberatore, C., & Riccardi, C. (2015). Development of antibacterial quaternary ammonium silane coatings on polyurethane catheters. *Journal of Colloid and Interface Science*, 451, 78–84. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2015.04.007>

Zarrini, G., Taheran, L., Zakerhamidi, M. S., & Khorram, S. (2016). Plasma can reduce *Staphylococcus epidermidis* biofilm formation on medical polymers. *Progress in Biological Sciences*, 6(1), 31–36.
<https://doi.org/10.22059/pbs.2016.59005>

Zhang, S., Wang, L., Liang, X., Vorstius, J., Keatch, R., Corner, G., Nabi, G., Davidson, F., Gadd, G. M., & Zhao, Q. (2019). Enhanced Antibacterial and Antiadhesive Activities of Silver-PTFE Nanocomposite Coating for Urinary Catheters. *ACS Biomaterials Science and Engineering*, 5,6(2019), 2804–2814.
<https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.9b00071>

Zhong, X., Xiao, L. H., Wang, D. L., Yang, S. W., Mo, L. F., He, L. F., Wu, Q. F., Chen, Y. W., & Luo, X. F. (2020). Impact of a quality control circle on the incidence of catheter-associated urinary tract infection: An interrupted time series analysis. *American Journal of Infection Control*, 48(10), 1184–1188.
<https://doi.org/10.1016/j.ajic.2020.01.006>

Efecto del Tratamiento Térmico de Recocido Intercritico sobre la Microestructura y su Resistencia a Corrosión y Desgaste de un Acero Grado PJ55

Effect of the Intercritical Annealing Heat Treatment on the
Microstructure and its Resistance to Corrosion and Wear of a PJ55
Grade Steel

Cynthia Abigail Guerra Linares^{*a}, Ma.de Jesús Soria Aguilar^b, Josefina Garcia Guerra^c,
Antonia Martinez Luevanos^d.

^{a, b, c} Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Metalurgia Unidad Norte UA de C,
Carretera 57, Km. 5. Zona Universitaria. Monclova, Coah. C.P. 25710, Monclova,
Coahuila.

^d Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ciencias Químicas Unidad Norte UA de
C, Blvd. V. Carranza s/n esq. con Ing. José Cárdenas Valdés. Col. Republica Ote. C.P.
25280. Saltillo, Coahuila.

Correo electrónico: cynthia_guerra@uadec.edu.mx

Resumen

Los tratamientos térmicos tienen como propósito mejorar la microestructura y por ende las propiedades mecánicas del acero. En este trabajo se busca en base de la literatura, la ruta óptima de procesamiento para transformar un acero convencional grado PJ55, comúnmente utilizado para tuberías en la industria petrolera, a un acero doble fase, que presente ductilidad y alta resistencia a la deformación. Además se pretende relacionar el estudio tribológico con la microestructura que se obtiene, a fin de evaluar la mayor resistencia al desgaste de este material.

Palabras clave: Acero PJ55, recocido, acero DP, resistencia, ductilidad, desgaste.

Abstract.

The purpose of heat treatments is to improve the microstructure and thus the mechanical properties of steel. In this work, based on the literature, the optimal processing route to transform a conventional steel grade PJ55, commonly used for pipes in the oil industry, to a dual phase steel, which presents ductility and high resistance to deformation. In addition, it is intended to relate the tribological study with the microstructure obtained, in order to evaluate the higher wear resistance of this material.

Key words: PJ55 steel, annealing, steel DP, resistance, ductility, wear.

1. Introducción

El grado de acero PJ55 se encuentra dentro de los grados de acero API 5CT, basados en los estándares de los códigos API (American Petroleum Institute), son utilizados en la construcción de tubos para, la industria petrolera y transporte de gas natural, por ello requieren propiedades como, soldabilidad, formabilidad, tenacidad a la fractura, resistencia a la corrosión bajo tensión y resistencia a la fatiga (Shaanxi World Iron & Steel Co., 2018).

Para lograr mejores propiedades de dicho material, se debe someter el acero a una serie de tratamientos térmicos, y así transformar su microestructura a un acero con características de alta resistencia (Advanced High Strength Steels), los cuales han sido ampliamente demandados, debido al interés en disminuir el peso de la estructura, sin reducir su resistencia mecánica, categoría en que se encuentran los aceros Doble Fase (Dual Phase Steel), los cuales se caracterizan por su microestructura, compuesta por ferrita y martensita, entre otras fases dispersas en mucha menor relación como bainita, perlita y austenita retenida que en conjunto proporciona mejor ductilidad y resistencia al material (Barajas Aguilar y col., 2016). De acuerdo con la Rodríguez, 2017 para obtener una microestructura de doble fase, el acero se produce por laminación en caliente, laminación en frío y/o tratamientos térmicos a temperaturas intercríticas, las cuales están comprendidas entre las líneas Ac_1 y Ac_3 del diagrama Fe-Fe₃C. El tratamiento de recocido se basa en calentar el acero hasta la zona intercrítica y así formar ferrita+austenita, después por medio del temple, que implica un rápido enfriamiento, se transforma completamente la austenita a martensita (Rodríguez, 2017).

El acero bifásico es un material que debido a su capacidad de mantener alta resistencia y buena ductilidad en conjunto, este tipo de acero se utiliza en la industria automotriz, transporte ferroviario, infraestructura, construcción naval y aeroespacial.

2. Clasificación de los aceros.

El acero es una aleación de hierro-carbono con pequeñas cantidades de elementos como silicio, fósforo, azufre, oxígeno, etc., que le proporcionan características específicas, volviéndolo el material principal en construcción, lo que permite referirse al mismo como acero estructural. De acuerdo con el Manual de Construcción en Acero 5ta Edición, las propiedades principales con las que debe de contar el acero son resistencia, ductilidad, soldabilidad, y tenacidad (Beltrán, 2016).

Acero Grado PJ 55.

El grado de acero PJ 55 o API 5CT, presenta buena resistencia a la tracción y dureza. De acuerdo con la norma API este tipo de acero es específico para tubos de acero dentro de la industria de petróleo y gas natural, también como cubierta o tubería para pozos. Dentro de los grados de acero 5CT se encuentra el J-55 el cual es de relativamente baja resistencia (Shaanxi World Iron & Steel Co., 2018).

Acero de alta resistencia doble fase (DP).

Los aceros de alta resistencia (Advanced High Strength Steels, AHSS), son aquellos que sustituyen a los aceros convencionales en diferentes aplicaciones para obtener mejores propiedades mediante la modificación de la microestructura. Dentro de la producción de aceros de alta resistencia y baja aleación (Ultra Light Steel Auto Body, USLAB), se considera acero de alta resistencia aquel cuyo límite elástico se encuentre en el rango de 210 – 550 MPa. En la Figura 1 se muestra el diagrama de conformabilidad global de los aceros AHSS. Estos aceros se fabrican mediante procedimientos físicos y químicos de los cuales resultan aceros templados y aleados con fósforo o boro (López, 2017)

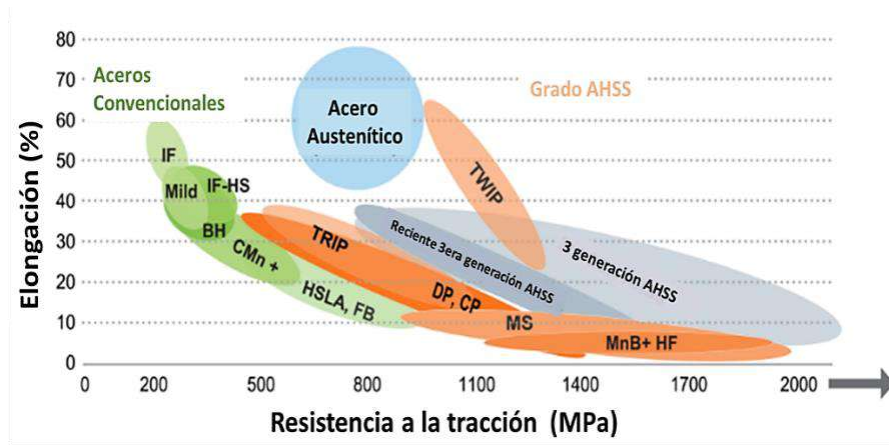


Figura 1. Diagrama de conformabilidad global de los aceros AHSS.

Fuente: (López, 2017)

Los aceros doble fase o “dual phase, DP” presentan dos fases en la microestructura, en la Figura 2 se muestra un esquema representativo, 20% de martensita dispersa en una matriz dúctil de ferrita, además de otras fases dispersas en menor relación como bainita, perlita y austenita retenida (Alibeyki y col., 2018).

Al añadir elementos como el manganeso, el cromo, el molibdeno, vanadio y níquel ayudan a la formación de la martensita, la cual puede ser regulada lo que cambia la relación entre resistencia y deformabilidad. Se caracterizan por presentar una resistencia tensil aproximada a los 550 MPa (80,000 psi.) (Bohórquez, 2012).

Cuando este tipo de acero se deforma, el esfuerzo se concentra en los límites de grano de la ferrita rodeado por las islas de martensita, concibiendo una alta velocidad de endurecimiento por deformación. La ferrita presente se encuentra

entre un 85-90% total de su microestructura, esto antes de sufrir deformación (Alibeyki y col., 2018).

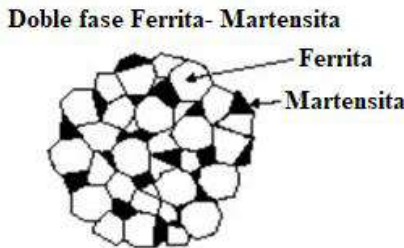


Figura 2. Microestructura esquemática del acero doble fase.

Fuente: (Alibeyki y col., 2018)

La microestructura es el resultado de una caracterización microestructural y mecánica de aceros de doble fase obtenidos por tratamiento térmico de austenizado, recocido intercrítico y temple, en la Figura 3 se muestra las microestructuras obtenidas por Castillo y col. 2018, de un acero estructural en estado inicial (Figura 3a) y tratado térmicamente, el tratamiento 1 consistió en austenizado inicial a 915 °C durante 30 minutos y enfriamiento en aire (normalizado), seguido por un calentamiento a una temperatura intercrítica de 780 °C por 30 minutos, finalizando con un temple en agua (Figura 3b), el tratamiento 2 consistió en un calentamiento a 915 °C por 30 minutos, con un enfriamiento posterior en agua, después el material fue calentado a 780 °C por 30 min. y enfriado en agua (Figura 3c), y el tratamiento 3 consistió en proceso termomecánico después que el material se normalizó desde una temperatura de austenización de 915 °C durante 20 minutos, luego se llevó a una temperatura intercrítica de 810 °C durante 20 minutos, posteriormente se aplicó una deformación del 10% en caliente, seguido de un temple en solución de NaOH al 5%.

En todas las microestructuras se observa la presencia de las dos fases, correspondientes a la martensita, regiones oscuras, y a la ferrita, regiones claras, no se visualizan diferencias notorias entre el tratamiento 1 y 2 (Figura 3b y Figura

3c), mientras que el tratamiento 3 (Figura 3d) presenta granos más asimétricos y alargados (Castillo y col., 2018).

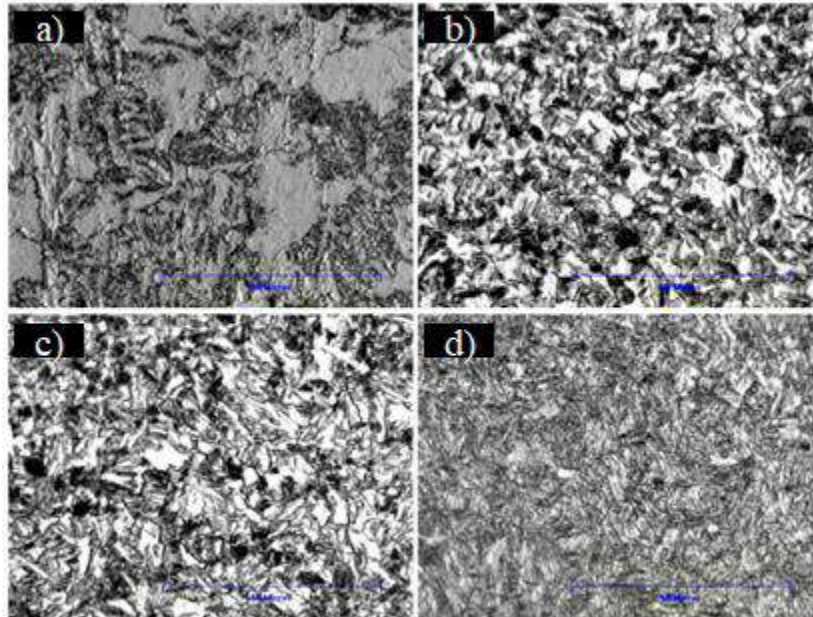


Figura 3. Micrografías de la microestructura de los aceros: a) estado inicial, b) tratamiento 1, c) tratamiento 2, d) tratamiento 3.

Fuente: (Castillo y col., 2018)

3. Obtención de los aceros doble fase.

Los aceros DP son fabricados controlando el enfriamiento de la austenita para después transformarla en martensita, sin embargo, dependiendo del proceso de fabricación, laminación en caliente, laminación en frío y/o tratamientos térmicos, pueden mejorar sus propiedades por la aparición de bainita (Rodríguez, 2017) Gonzales (2019) estudiaron el desarrollo de un acero de medio Mn con adiciones de B y V, de dicho estudio se obtuvo la Figura 4, que muestra el diagrama hierro-carbono donde se observa que es posible experimentar con aceros templados desde temperaturas de 730°C para obtener aceros bifásicos con altos contenidos de ferrita, o templar a temperaturas de 850°C para obtener aceros bifásicos con

altos contenidos de martensita. Las cantidades de martensita y ferrita indican las propiedades mecánicas deseadas en un material (González, 2019)

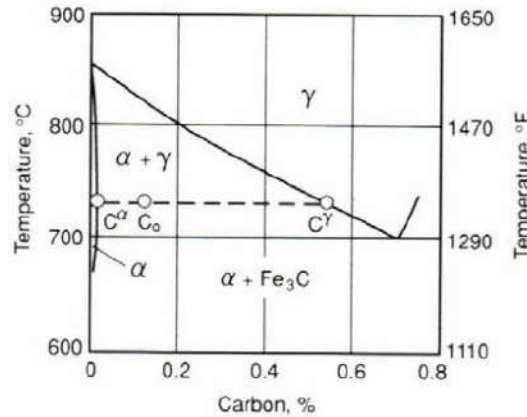


Figura 4. Diagrama fase para acero con 1.5% Mn.

Fuente:(González, 2019)

Soria y col. (2015) estudiaron el efecto del tratamiento térmico sobre las propiedades mecánicas y microestructura de un acero API 5CT, sometido a los tratamientos de austenizado a 890, 920 y 950 °C durante 22, 24 y 26 min., y revenido a 460, 480 y 500 °C durante 22, 24 y 26 min.; presentando microestructuras mostradas en la Figura 5, donde 5a y 5c, corresponden a martensita en forma de agujas con regiones de austenita retenida en probetas tratadas por austenizado seguido de temple en agua, el temple facilita la transformación de la austenita a martensita lo que incrementa las propiedades mecánicas.

Las probetas sometidas a un austenizado y revenido Figura 5b y 5d, presentaron martensita revenida con pocas regiones de austenita, esto no presenta cambio significativo en la microestructura ni en el tamaño de grano, por lo que el revenido no afectó las propiedades mecánicas (Soria y col., 2015)

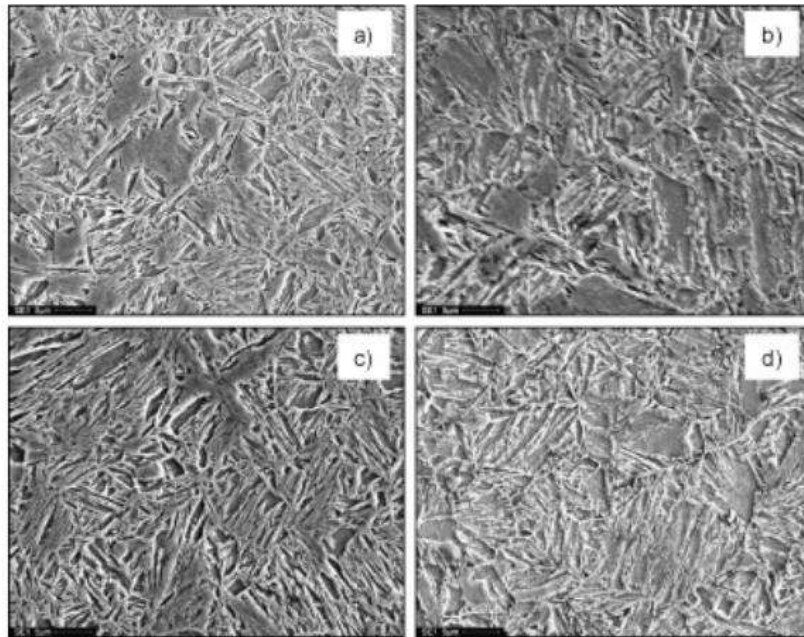


Figura 5. Fotomicrografías MEB de las muestras de tubo, a) austenizado, b) austenizado y revenido, c) austenizado y d) austenizado y revenido.

Fuente:(Soria y col. 2015)

3.1. Tratamiento térmico de recocido intercrítico.

El tratamiento de recocido es esencial en estos aceros, ya que de ahí se obtiene la fase más dura. Diversos estudios han demostrado que el recocido efectuado entre temperaturas intercríticas para aceros de bajo y medio carbono presentan estructuras bifásicas ferrítico-martensítica con mayor ductilidad que aquellos aceros de baja aleación normalmente endurecidos por precipitación (Petite y col., 1998).

Para promover una fase dual de ferrita y martensita, se realizó un nuevo tratamiento de recocido intercrítico de aceros resistentes al desgaste con boro de bajo impacto ambiental, se calentó el acero hasta llegar al campo $\alpha+\gamma$ del diagrama Fe-C, esto es en el rango de temperaturas intercríticas comprendidas entre las líneas A_{c1} y A_{c3} que dependen de la composición de cada acero, en este estudio se utilizaron temperaturas entre 750-770 °C, y posteriormente fueron templadas en agua,

provocando un ahorro energético, reducción de tiempo de producción y un impacto ambiental favorable. Obteniendo una estructura de ferrita + martensita (Will y Mugas, 2020)

Se aumenta la resistencia en los aceros DP cuando cualquier fracción volumétrica o resistencia (dureza) de la fase martensita es aumentada, ver Figura 6. Se evaluaron las propiedades mecánicas en recubrimientos galvanizados por doble inmersión en caliente sobre acero al carbono doble fase, presentando la dependencia de la resistencia de la fase de martensita, la cual es determinada por las condiciones de templado intercrítico y el contenido original de carbono en el acero. La resistencia de la fase de ferrita depende del tamaño de grano y las contribuciones del endurecimiento de la solución sólida de los elementos aleantes (Carrasquero y col., 2019)

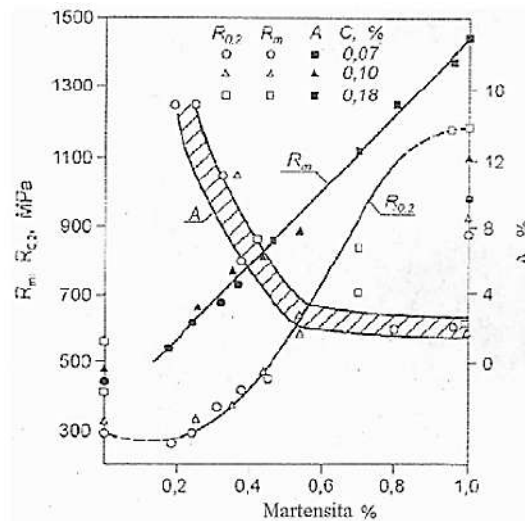


Figura 6. Relación de propiedades mecánicas de acero de doble fase en la relación del contenido de carbono y la fase de martensita.

Fuente:(Carrasquero y col., 2019)

La Figura 7 muestra el diagrama TTT del acero PJ 55, proporcionado por la empresa Altos Hornos de México S.A.B. de C.V que muestra las temperaturas intercríticas en el rango de 709.8 a 810.7 °C. Lo que indica que a la temperatura del tratamiento de

recocido intercrítico solo se presenta la fase de ferrita, por lo que para obtener austenita, el acero se calentara a una temperatura superior a los 800 °C.

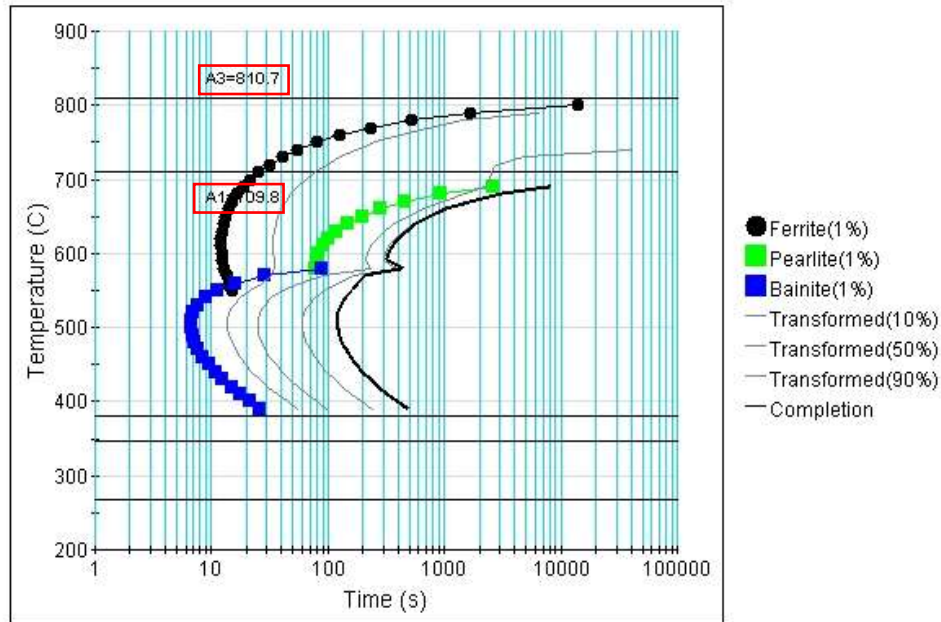


Figura 7. Diagrama TTT del acero grado PJ55.

Fuente: (Altos Hornos de México, S.A.B. de C.V.)

4. Estudio de la resistencia a la corrosión y/o abrasión en aceros tratados térmicamente.

Por medio de los tratamientos térmicos también se puede mejorar la resistencia a la corrosión.

El acero A36 es un acero estructural al carbono, que al igual que el acero PJ 55, es muy utilizado en la construcción de estructuras metálicas. Se estudió y caracterizo el acero A36 tratado térmicamente como sustituto para la fabricación de tanques mezcladores de hormigón, para determinar si el material cumple con las propiedades adecuadas de su aplicación, las probetas fueron sometidas a una serie de tratamientos de templado, recocido, normalizado, revenido y cementado. Posteriormente se realizó un estudio metalográfico y ensayos de dureza, tracción, flexión, y desgaste. En este último se siguió la norma ASTM G99, donde los autores

la definen como la norma que “indica el desgaste que sufre una probeta tipo pin, en la que se conoce la masa inicial, forma, y dimensiones, ésta es ensayada sobre un disco que gira a velocidad constante mientras es presionada con una carga uniforme, finalmente se debe tomar datos de la pérdida de masa o a su vez la disminución de la longitud del pin durante ciclos de tiempo determinado”. Se realizaron 3 ensayos de desgaste a diferentes velocidades en el disco y cargas en la probeta cilíndrica (pin), 10 N y 100rpm , 15 N y 150rpm, 20 N y 200rpm, resultando un comportamiento similar en las gráficas del material templado y cementado, ver Figura 8, lo que demuestra que la resistencia está relacionada directamente a la dureza del material (Vásquez, 2019)

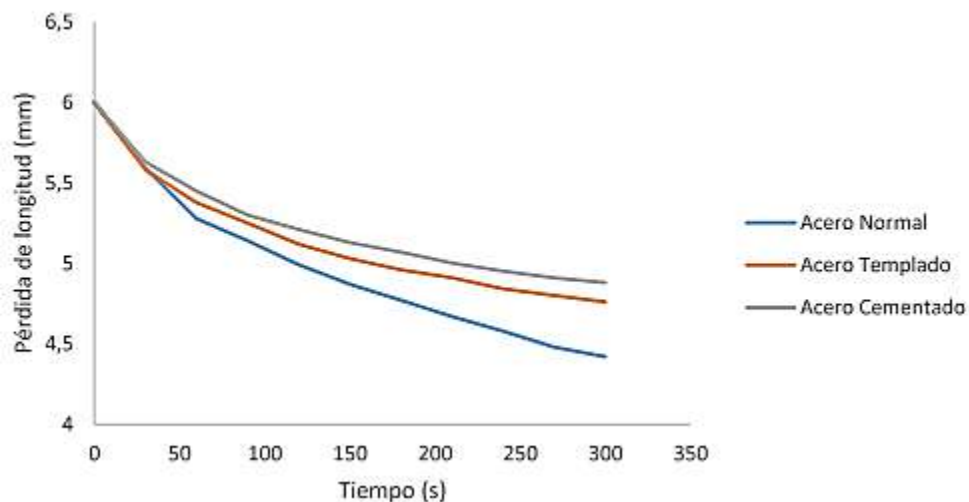


Figura 8. Curvas de desgaste a 15N Y 150 RPM para los aceros tratados y sin tratar.

Fuente:(Vásquez, 2019)

Para poder reducir la velocidad de corrosión en la aleación AZ31B, se analizó la influencia del tratamiento térmico de recocido a 345 °C durante una hora, lo que ocasionó la nucleación acelerada de nuevos granos en forma de maclas, y posteriormente se realizó un tratamiento de liberación de tensiones a 160 °C durante una hora. El material de aporte fue la misma aleación que el material base y la

aleación AZ92. Se identificó corrosión por picaduras y corrosión uniforme durante los ensayos gravimétricos. Las probetas de la aleación AZ92 presento una velocidad de corrosión similar, aunque algo superior a las de AZ31. Sin embargo, de acuerdo con la literatura, esto se puede atribuir por el contenido de aluminio. En cuanto a la influencia de los tratamientos térmicos, las probetas tratadas para liberar tensiones, presentaron menores velocidades de corrosión, esto se debe por la reducción de defectos en la red del material, disminuyendo la cantidad de maclas en la red cristalina, evitando que se produzca una dislocación anódica del material (Colao, 2017).

El recocido también reduce la velocidad de corrosión, por la completa recristalización de la estructura presentando granos equiaxiales pequeños libres de defectos. Lo que concluye que, según aumente la cantidad de defectos cristalográficos, la velocidad de corrosión será mayor.

Se analizó la resistencia al desgaste de las aleaciones FeMnAl (AF_1 y AF_2) tratadas térmicamente a temperaturas de 600 °C y 750 °C y sin tratar, y se compara por medio del ensayo pin-on-disk, con un acero inoxidable ASTM A240. Para realizar el ensayo tribológico se utilizó pin de alúmina de diámetro de 6mm a una carga de 10N y 120rpm a 25 °C y 300 °C. Como se muestra en la Figura 9, los desgastes llevados a cabo a temperatura ambiente de las aleaciones FeMnAl tratadas térmicamente presentan mejor comportamiento al desgaste que el acero ASTM A240. La aleación AF_2 obtiene un incremento de dureza después de ser tratada térmicamente y eso incrementa su resistencia al desgaste notablemente, se puede deber por la mayor cantidad de elementos aleantes que endurecen la aleación por solución sólida sustitucional. Solo la aleación AF_1 obtiene mejor resistencia al desgaste a 300 °C que a 25 °C. Debido a mayor presencia de manganeso, característica de este tipo de aleaciones (Ipaz y col., 2013)

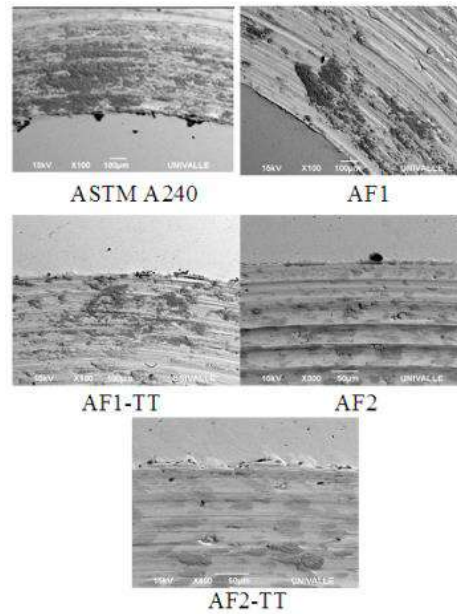


Figura 9. Morfología de huellas de desgaste ensayadas a temperatura ambiente.

Fuente:(Ipaz y col., 2013).

5. Conclusión.

El acero es primordial en construcción y por ello su proceso de obtención se ha innovado acorde al avance tecnológico de la sociedad, es uno de los materiales que se encuentra en constante estudio con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas, para que sean adecuadas a futuras aplicaciones.

Al ser tratado térmicamente el acero dentro del rango de temperaturas intercríticas, las cuales se encuentran entre las líneas Ac_1 y Ac_3 del diagrama hierro- carbón, se obtiene la transformación de la microestructura del acero base a un acero de doble fase, ferrita- martensita, dependiendo el porcentaje de las fases de las variables de tiempo de permanencia, temperatura y medio de enfriamiento para la realización del tratamiento, lo que accede a grandes posibilidades de rutas de obtención.

Para entender los parámetros en la respuesta de los materiales bajo desgaste se realiza un estudio tribológico con la finalidad de mejorar la resistencia al desgaste y corrosión, mostrando que dependiendo de los elementos de aleación y el

tratamiento al cual sea sometido el material, serán los factores primordiales para mejorar esta propiedad en el material de estudio.

6. Agradecimiento.

Los autores agradecen al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad Autónoma de Coahuila, por su apoyo en la realización de este artículo de divulgación que es parte del proyecto de tesis: “Efecto del tratamiento térmico de recocido intercrítico sobre la microestructura y su resistencia a corrosión y desgaste de un acero grado PJ55”. A la empresa AHMSAB de CV por la aportación de los materiales.

7. Referencias.

- Alibeyki, M., Mirzadeh, H., y Najafi, M. (2018). Fine-grained dual phase steel via intercritical annealing of cold-rolled martensite. *Vacuum*, 155, 147–152. <https://doi.org/10.1016/J.VACUUM.2018.06.003>
- Barajas Aguilar, N. C., García Lara, A. M., Camporredondo Saucedo, J. E., Equihua Guillén, F., y Castruita Ávila, L. (2016). Tendencia de los aceros y su aplicación en la industria automotriz. *CienciaCierta*, 12.
- Beltrán, S. (2016). *Manual de construcción en Acero. Diseño por esfuerzos permisibles* (p. 454).
- Bohórquez, C. A. (2012). *Influencia Del Tratamiento Térmico Desde Temperaturas Intercríticas En Las Propiedades Mecánicas Del Acero Sae 1045*. XXXI, 3577–3587. <http://www.amcaonline.org.ar>
- Carrasquero, E. J., Rico O., Y., y Minchala, J. (2019). Evaluación de propiedades mecánicas en recubrimientos galvanizados por doble inmersión en caliente sobre acero al carbono. *Ingenius*, 22, 80–89. <https://doi.org/10.17163/ings.n22.2019.08>

- Castillo, D. E., Angarita Moncaleano, I. I., y Rodríguez Baracaldo, R. (2018). Caracterización microestructural y mecánica de aceros de fase dual (ferrita-martensita), obtenidos mediante procesos térmicos y termomecánicos. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 26(3), 430–439. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052018000300430>
- Colao, D. P. (2017). *Influencia de los tratamientos térmicos en resistencia a la corrosión en medios salinos de uniones soldadas de aleación de magnesio AZ31B*. 102. http://oa.upm.es/47846/1/TFG_DAVID_PALOMO_COLAO.pdf
- González, C. (2019). *Desarrollo de un acero de medio Mn con adiciones de B y V para aplicaciones automotrices*.
- Ipaz, L., Aperador, W., y Esguerra Arce, A. (2013). Influencia de un tratamiento térmico en el comportamiento tribológico de aceros Fe-Mn-Al. *Revista Mexicana de Física*, 59, 322–327.
- López, J. (2017). *Acero USLAB para mejorar la resistencia mecánica del chasis*. (p. 12).
- Petite, M. M., Monsalve, A., Gutiérrez, I., Zaitegui, J., y Larburu, J. I. (1998). Modelización de la evolución microestructural durante el recocido continuo de chapas de acero bajo en carbono. Predicción de las propiedades mecánicas. *Revista de Metalurgia*, 34(EXTRA), 333–337. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.1998.v34.iextra.765>
- Rodríguez, M. (2017). *Obtención y caracterización microestructural de un acero doble fase*.
- Shaanxi World Iron & Steel Co., L. (2018). Una breve introducción de API 5L, API 5B, API 5CT y API 5D. En *World Iron & Steel* (pp. 1–10).
- Soria, Ma de Jesús, Carrillo, F. (2015). Efecto del tratamiento térmico sobre las propiedades mecánicas y microestructura de un acero para tubería API 5CT J55 Effect of Heat Treatment on the Mechanical Properties and Microstructure of a API 5CT J55 Pipeline Steel. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 16(4), 539–550. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2015.09.006>

Vásquez, M. F. (2019). *Estudio y caracterización del acero A36 tartado termicamente como sustituto para la fabricacion de tanques mezcladores de hormigon.* 157.

<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/786%0Ahttps://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/786/1/CD-1222.pdf>

Will, G., y Mugas, Q. (2020). *Tr atamiento Térmico de Recocido Intercrítico de Aceros Re sistentes al Desgaste con Boro de Bajo Impacto Medioambiental .*

Dinámica de la industria hotelera en los pueblos mágicos de Coahuila

Dynamics of the hotel industry in Coahuila's pueblos mágicos

César Barboza-Lara, Leonor Gutiérrez-González y Horacio Salas-Torres
Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Contaduría y Administración,
Carretera 57 km. 4.5 Col. Universidad, C.P. 25710, Monclova, Coahuila.

Correspondencia para autor: cesar.barboza@uadeC.edu.mx

Resumen

El objetivo del artículo consiste en analizar el entorno empresarial y la dinámica de los negocios en la industria hotelera en los Pueblos Mágicos de Coahuila desde una perspectiva sociodemográfica. Lo anterior implica el estudio y descripción de variables demográficas como: la edad de los negocios, generación, población de negocios, empleo, entre otros, para desarrollar una radiografía de las empresas hoteleras creadas en los Pueblos Mágicos en Coahuila. En la actualidad, el estado se posiciona en el quinto lugar nacional por el número de Pueblos Mágicos, con siete, los cuales son: Arteaga, Candela, Cuatro Ciénegas, Guerrero, Muzquiz, Parras de la Fuente y Viesca. No obstante, existen escasos estudios que hayan abordado el efecto de la implementación del programa desde la perspectiva de la demografía de los negocios y su impacto en otros indicadores como la generación de empleo y mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes de cada Pueblo Mágico.

Palabras clave: pueblos mágicos, demografía empresarial, hoteles.

Abstract

The objective of the article is to analyze the business environment and business dynamics in the hotel industry in Coahuila's Pueblos Magicos from a sociodemographic perspective. This implies the study and description of demographic variables such as: the age of the businesses, generation, business population, employment, among others, to develop a business profile of the hotel companies created in the Pueblos Magicos in Coahuila. Currently, the state is ranked fifth nationally by the number of Pueblos Magicos, with seven, which are: Arteaga, Candela, Cuatro Cienegas, Guerrero, Muzquiz, Parras de la Fuente and Viesca. However, there are few studies that have addressed the effect of the implementation of the program from the perspective of business demography and its impact on other indicators such as job creation and improvement of the quality of life of the population of each Pueblo Magico.

Keywords: pueblos magicos, business demography, hotels.

Introducción

El Programa Pueblos Mágicos (2001) nació en 2001 como una forma de promover el crecimiento en el turismo hacia algunas localidades con características específicas. Según la Secretaría de Turismo (2020) un pueblo mágico se define como: “una localidad que tiene atributos únicos, simbólicos, historias auténticas, hechos trascendentes, cotidianidad, que significa una gran oportunidad para el aprovechamiento turístico atendiendo a las motivaciones y necesidades de los viajeros”.

Además de impulsar un mayor número de visitantes a estos destinos, el programa también ha traído algunos beneficios importantes que es necesario conocer, como lo es la creación de negocios y pequeñas empresas destinadas a satisfacer las demandas del turista que visita los pueblos mágicos. Este desarrollo local se realiza, como afirma Fernández (2016) “a través de la diversificación de mercados y de la competitividad, además, en el marco municipal, por las características específicas del programa que enfatiza la creación de negocios y empleos en el espacio local en pequeñas localidades”. Esto da oportunidad a emprendedores locales que conocen mejor que nadie su entorno, para iniciar nuevos negocios en el sector turístico, como hoteles, restaurantes, tiendas de recuerdos, entre otros.

Los primeros pueblos mágicos que obtuvieron la denominación fueron Huasca de Ocampo, Hidalgo y Real de Catorce, San Luis Potosí (López y col., 2015). Dos décadas después del inicio del programa, actualmente existen 132 pueblos mágicos en México. Esta política del gobierno federal surge dado que hasta ese momento no existía alguna estrategia específica para la promoción de los pueblos o pequeñas ciudades cuyas costumbres, tradiciones, folklore, arquitectura y personajes fuesen atractivas para el turismo cultural, así como también por la carencia de programas de desarrollo local” (Equihua y col., 2015).

Algunos indicadores dan testimonio del impacto positivo para las comunidades que reciben más turistas a partir del nombramiento del pueblo mágico. Distintos

estudios han evidenciado esta tendencia: por ejemplo, Equihua y col. (2015) destacan que se observan mejoras en la cuestión de la infraestructura y los servicios públicos, en la creación de empleos y en el nacimiento de pequeñas y medianas. Estos autores incluso advierten que en algunos pueblos ha disminuido la migración en la medida en que se reactivan las actividades productivas del pueblo.

El estado de Coahuila no ha escapado a esta tendencia. En la actualidad se cuenta con siete pueblos mágicos en la entidad, lo que la convierte en el quinto estado con mayor número de Pueblos Mágicos en el país. Estos municipios son: Arteaga, Candela, Cuatro Ciénegas, Guerrero, Melchor Muzquiz, Parras de la Fuente y Viesca. Cada uno de ellos presenta distintos atractivos que los han convertido en puntos de atracción de turistas a nivel estatal y regional.

En este contexto, el objetivo de este artículo consiste en analizar el comportamiento que ha tenido la industria hotelera en los siete pueblos mágicos de Coahuila, mediante la caracterización de estas empresas de alojamiento, y estimar algunas variables de índole demográfica. Este propósito se justifica en la medida en que un elemento que ha sido poco estudiado consiste precisamente en determinar en qué medida la implementación de este programa ha generado bienestar y desarrollo empresarial en los municipios beneficiados, toda vez que uno de los retos de los pueblos mágicos es el “favorecer que los pobladores locales aprovechen las oportunidades de negocio” (García y Guerrero, 2014).

1. Los pueblos mágicos en Coahuila

Como ya se ha mencionado, Coahuila cuenta actualmente con siete pueblos mágicos. Es una de las entidades que mas denominaciones de este tipo tiene en todo el país, lo que refleja la importancia de esta industria para el crecimiento de los municipios que cuentan con el nombramiento. Cada uno de los siete pueblos mágicos cuenta con determinados atractivos que los hacen únicos y diferentes, por lo que es posible hablar de una red turística con potencial de crecimiento para aprovechar las características de cada pueblo mágico.

Este sistema en red de pueblos mágicos se podría materializar en la medida en que cada región del estado cuenta con al menos un pueblo mágico. Se han identificado en Coahuila un total de cinco regiones socioeconómicas (Aguirre y col., 2018), y cada una de ellas tiene por lo menos, un pueblo mágico. Al norte del estado, en la región fronteriza se encuentra Guerrero, que desde el año 2015 tiene el nombramiento; en la región carbonífera se localiza el último de los municipios que ha obtenido la denominación, Melchor Muzquiz; en la región centro-desierto se ubican dos pueblos: Candela, desde el 2015, y Cuatro Ciénegas, a partir del 2012. En la región laguna se sitúa Viesca, que en el 2012 se denominó pueblo mágico. Por último, en la región sureste está Arteaga, que se adhirió al programa en el 2012 y Parras de la Fuente, que tiene la característica especial de ser el primer pueblo mágico, no solo del estado, sino de todo el norte de México, en el 2004.

1.1 Parras de la Fuente: el primer pueblo mágico.

Parras de la Fuente fue el primer pueblo mágico que obtuvo tal denominación en todo el norte de México, en el año 2004, lo que significa que han transcurrido 17 años en los que se ha trabajado en la consolidación de este destino como un punto de referencia en Coahuila. Parras es un municipio que cuenta con un total de 44 472 habitantes, según el último Censo de Población y Vivienda del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020). Un dato relevante es que la población disminuyó en 10 años, al pasar de 45 401 en el 2010 a 44 472 en 2020, es decir, una pérdida poblacional de casi 1 000 habitantes en una década.

En las casi dos décadas que tiene de ser pueblo mágico, Parras ha experimentado una serie de cambios importantes con el objetivo de atraer diferentes tipos de turistas, lo que también ha impactado el entorno y la oferta hotelera del municipio. Los principales atractivos se pueden dividir en tres categorías: turismo cultural/esparcimiento, enoturismo y turismo de eventos.

Los principales atractivos relacionados con el turismo cultural y de esparcimiento son la Plaza de Armas, el Palacio Municipal, la Iglesia de San Ignacio de Loyola, la Parroquia de la Asunción, la Plaza del Beso, la Alameda 20 de noviembre, el

Santuario de la Virgen de Guadalupe, la Capilla de Santo Madero, el Cañón de la Lima, el Cañón La Bandera, el Fuque y el Estanque de la Luz. Estos atractivos son parte de la historia de Parras y han recibido continuamente una gran cantidad de turistas.

A partir de la denominación de Pueblo Mágico, se ha incrementado el interés por la industria del vino en la ciudad. Este pueblo mágico es sede de la casa vinícola más antigua de todo el continente americano, Casa Madero, por lo que la producción de vino ha sido toda una tradición en la ciudad, mientras que lo que ha evolucionado ha sido la generación de nuevas experiencias relacionadas con el consumo del vino. Actualmente se tienen cerca de una veintena de vinícolas en la ciudad, entre las que se encuentran: Casa Madero, Bodegas de Perote, Bodegas el Vesubio, Rivero González, Segovia Fuantos, Hacienda el Marques, Vinos Don Leo, Las Pudencianas, Barro Viejo, Don Remigio, Vinos Parvada, entre otros.

Es posible señalar que, incluso, la producción y degustación del vino se ha convertido en el principal motivo para visitar Parras para un tipo particular de turistas, que cada fin de semana llegan a este pueblo mágico para conocer y experimentar el proceso del vino y todas las experiencias que se han generado alrededor de él. Derivado de esta situación, el turismo de eventos también ha mostrado un significativo avance en la ciudad, ya que parte de la promoción que se hace el pueblo, consiste principalmente en el desarrollo y organización de eventos sociales para turistas regionales y estatales.

Como se pudo observar, Parras de la Fuente es uno de los destinos turísticos más consolidados en Coahuila, que prácticamente cada fin de semana recibe visitantes que llenan los espacios disponibles de alojamiento, lo que ha generado un crecimiento importante en esta industria, lo cual será analizado más adelante.

1.2 Cuatro Ciénegas: el desierto y la vida

El municipio de Cuatro Ciénegas, ubicado en la región centro-desierto del Estado, también es uno de los destinos turísticos más importante de Coahuila, incluso de

México, por las características naturales que presenta el territorio en donde se asienta. Cuatro Ciénegas tiene actualmente una población de 12 715 habitantes, cifra que también disminuyó en comparación con diez años atrás, cuando vivían en el municipio 13 013 personas (INEGI, 2020).

Cuatro Ciénegas de Carranza es, desde 2012, un pueblo mágico. En los casi diez años desde su nombramiento, ha visto incrementar el número de turistas que recibe cada año, así como también el entorno de negocios y empresas hoteleras que invierten en el municipio.

Los principales atractivos de la ciudad son de orden natural, ya que poseen una riqueza inconmensurable reconocida por autoridades nacionales e internacionales, localizadas en lo que se conoce como Valle de Cuatro Ciénegas, un vasto territorio muy cerca del pueblo mágico, en donde se pueden visitar diferentes atractivos, como lo son: la Poza Azul, el Rio San Marcos (o Parque Natural Aruna), las Minas de Mármol, las Dunas de Yeso, las Playitas (a las que solo se tiene acceso con el acompañamiento de un guía especializado), y muchos otros atractivos temporalmente cerrados a los turistas, por motivos de conservación.

Dentro del pueblo mágico, los principales atractivos que se pueden visitar son: el Museo Venustiano Carranza, el Templo de San José, el Centro Histórico, la Presidencia Municipal o la Casa de la Cultura. Adicionalmente el pueblo también cuenta con dos casas vinícolas de gran tradición en el municipio, como son las Bodegas Ferriño y Vinos Vitali. Adicionalmente, uno de los ramos turísticos que, al igual que Parras, ha cobrado un auge importante en los últimos años es el de eventos y convenciones, en donde se promueve la realización de eventos sociales, lo que genera una mayor cantidad de visitantes que utilizan la creciente oferta hotelera.

1.3 Arteaga: bosque y naturaleza

Arteaga es un pueblo mágico ubicado en el sureste de Coahuila. Tiene el nombramiento desde el año 2012, por lo que, casi una década después, ha

consolidado una oferta turística importante en actividades relacionadas con el entorno natural, dado su privilegiada ubicación y proximidad a la sierra coahuilense. La situación de Arteaga es particular en el sentido de que, como tal, el pueblo mágico se concentra en la cabecera municipal, pero se ha explotado un tipo de turismo enfocado en actividades al aire libre, las cuales se realizan en localidades ubicadas fuera del territorio delimitado como pueblo mágico.

La población total de todo el municipio asciende a 29 578 (INEGI, 2020), la cual creció de manera significativa en el periodo intercensal, al pasar de 22 544 en el 2010, a la cifra mencionada, lo que implica un crecimiento absoluto de más de siete mil nuevos habitantes, contrario a lo que ocurrió en Parras y Cuatro Ciénegas. Sin duda, este crecimiento estaría relacionado por la cercanía que tiene Arteaga con los municipios conurbado de Saltillo y Ramos Arizpe.

Los principales atractivos de Arteaga, dentro de la cabecera municipal son: la Presidencia Municipal, la Casa Carranza, la Iglesia de San Isidro Labrador de las Palomas, la Plaza de Armas, la caminata que se puede realizar por la Acequia de Arteaga, sobre la avenida Román Cepeda y la extensa Alameda Venustiano Carranza.

Después de recorrer el centro de la ciudad, a pocos kilómetros se encuentra San Antonio de las Alazanas, lugar donde se puede visitar el Museo de las Momias y empezar el recorrido por la Sierra de Arteaga, en donde se podrá apreciar un extenso bosque. De hecho, la oferta hotelera de Arteaga se caracteriza por su dispersión en distintos puntos del municipio. La gran mayoría de las unidades de alojamiento consisten en cabañas enclavadas en la sierra, en donde destaca el complejo Monterreal, al contar con la única pista para esquiar en México. Esta oferta comercial para pasar la noche ha ido en incremento desde el nombramiento de pueblo mágico, y se pueden encontrar por todo el territorio de Arteaga, principalmente en San Antonio, Los Lirios, Mesa de las Tablas, o El Tunal.

Finalmente, en Arteaga también se ha empezado a desarrollar el enoturismo, con la presencia de algunas casas productoras, como Bodega Los Cedros y Bodegas

del Viento, que contribuyen a incrementar los motivos de visita a este pueblo mágico.

1.4 Viesca: aventura al natural.

Viesca es una pequeña localidad ubicada en la región lagunera de Coahuila. Es pueblo mágico desde el año 2012, por lo que también está a punto de cumplir una década desde su nombramiento. La población en el municipio pasó de 21 319 en el 2010 a 20 305 en el último Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2020). Es decir, también sufrió una pérdida de población de cerca de mil habitantes en diez años.

Los principales atractivos del pueblo mágico se concentran en el centro histórico, por un lado, y, además, en entornos naturales que caracterizan al pueblo. En primer lugar, en el perímetro que comprende el Centro Histórico, además de homologar la imagen de las construcciones, e instalar señalética similar para indicar el tipo de lugar que es, se encuentra: la Presidencia Municipal, la Plaza de Armas, el Reloj Bicentenario, la Casa de la Cultura, la Plaza del Carmen o la Parroquia de Santiago Apóstol. Cerca del centro histórico, se encuentra el Parque Recreativo Juan Guerra, considerado un importante atractivo para los turistas. Recientemente se ha invertido en la instalación de un Centro de Investigación y Jardín Etnobiológico, para profundizar en el conocimiento del entorno natural de Viesca, de la mano de la Universidad Autónoma de Coahuila.

Pero, sin duda, el principal atractivo de este pueblo mágico lo representan las Dunas de Bilbao. Este atractivo es una extensa área natural protegida de 16 hectáreas, aunque solo se pueden realizar actividades turísticas en un espacio delimitado, como tabla de arenas, paseos o ejercicio.

1.5 Candela: encuentro con la naturaleza

En el centro del estado de Coahuila se ubica Candela, que desde el 2015 es pueblo mágico. Este tranquilo lugar es apto para quienes buscan un contacto con la

naturaleza, puesto que sus principales atractivos se ubican en los alrededores del pueblo. Destaca sin duda el Corredor Turístico Las Lajas, que consiste en cuatro espacios distintos para disfrutar del cauce del Rio Candela: Los Carricitos, Ojo Caliente, Las Lajitas y El Frentón.

Otro punto de interés que también se ubica en las afueras del pueblo, a 17 kilómetros, es la Estación Candela. Este edificio era la antigua estación de ferrocarril y, aunque geográficamente se ubica en Nuevo León, se considera un atractivo de Candela por su cercanía y vínculos históricos. Ya dentro del pueblo se ubican distintos atractivos que es posible recorrer caminando por las tranquilas calles de Candela, como la Presidencia Municipal, la Plaza de Armas, el Museo Federico Berrueto Ramón, la Capillas del Santo Cristo y el Centro Histórico.

1.6 Guerrero: historia y frontera.

En el 2015 obtuvo el nombramiento de pueblo mágico este municipio fronterizo de Coahuila en donde residen 1 643 habitantes, según el último Censo de Población (INEGI, 2020). Dentro de sus atractivos más importantes destaca la Misión de San Bernardo, un imponente y emblemático lugar con mucha historia, ya que desde este punto inició el proceso de evangelización de los franciscanos en Coahuila y Texas. Es una parada obligatoria al visitar este pueblo mágico. Además de este punto, también es indispensable recorrer su bello y tranquilo centro histórico, en donde se puede visitar la blanca Parroquia de San Juan Bautista y recorrer la Plaza Principal. Otro punto de interés es el Parque La Pedrera, una importante área verde en el pueblo mágico con distintas opciones de esparcimiento.

Además de estos atractivos, en Guerrero destaca también el turismo cinegético, ya que cuenta con una importante red de más de 70 ranchos para la práctica de la caza de distintas especies, principalmente el venado cola blanca.

1.7 Muzquiz: mosaico cultural y étnico.

El pueblo mágico de Muzquiz, el más reciente con el nombramiento hace apenas tres años, es un lugar con una serie de atractivos de distinta índole: culturales,

naturales e históricos. En primer lugar, destacan los Museos de Paleontología, el Museo Histórico de Muzquiz, el Museo de la Ganadería y el Museo Quinta Julio Galán, así como la Iglesia de Santa Rosa de Lima y la Plaza Hidalgo.

Por otro lado, en la cuestión natural, es indudable la belleza de los parajes como el Parque La Cascada y la Sierra de Santa Rosa, en donde se puede practicar senderismo y otras actividades al aire libre.

El legado étnico en Muzquiz es indudable. La presencia de la tribu Kikapú y los Negros Mascogos, afrodescendientes asentados en Coahuila huyendo de las condiciones de esclavitud en Estados Unidos, sin duda contribuyen a enriquecer el valor cultural de este pueblo mágico.

En suma, la presencia de estos siete pueblos mágicos fortalece la industria turística coahuilense, cuyo impacto en el ámbito empresarial se refleja en un mayor número de instalaciones y aperturas de establecimientos dedicados al hospedaje, como hoteles, moteles, cabañas y otros formatos, ya que, como afirma Shaadi y col. (2017), los pueblos mágicos representan “localidades que requieren orientarse para mejorar y optimizar el aprovechamiento racional de sus recursos y atractivos naturales y culturales, fortalecer su infraestructura, la calidad de los servicios, la innovación y desarrollo de sus productos turísticos, el marketing y la tecnificación”.

2. La demografía empresarial y sus aplicaciones teóricas

La demografía de los negocios, o demografía empresarial es una rama de estudio que se encarga de aplicar los métodos demográficos a un conjunto de organizaciones con el objetivo de entender mejor su dinámica y comportamiento en el tiempo (Smith y Morrison, 2005). Es una disciplina relativamente reciente que aun no ha sido del todo explotada para efectos analíticos. España fue uno de los primeros países en donde se utilizó esta herramienta para comprender la dinámica de los negocios, en lo que se conoce como Demografía Armonizada de Empresas, que tiene como propósito generar indicadores sobre un conjunto de empresas,

especialmente lo relativo al stock, nacimiento, muertes y su sobrevivencia (Instituto Nacional de Estadística, 2019).

Por su parte, en nuestro país es el INEGI, el organismo que ha desarrollado esta perspectiva considerando algunas variables como la *edad de los negocios*, que se define como el número de años de vida de un negocio desde su nacimiento hasta un determinado corte en el tiempo (en este caso 2021); la variable *generación* significa la población total de negocios que nacieron en un año determinado; la *mortalidad*, que se define desde un punto de vista demográfico como la desaparición de los negocios en un momento en el tiempo, lo cual puede ocurrir por un cambio de razón social, cambio de ubicación o cierre de operaciones; o la esperanza de vida de los negocios, entendida como el número de años que se espera sobreviva un negocio con base en su actividad, tamaño y edad actual (INEGI, 2016).

Analizar los negocios desde una perspectiva demográfica contribuye a un mayor entendimiento sobre la dinámica empresarial de una ciudad, o un grupo de ciudades, como en este caso los pueblos mágicos de Coahuila, ya que permitiría generar estrategias específicas que podrían impedir el cierre de los negocios con base en su edad, esperanza de vida, nacimiento o características más importantes, considerando además que “se sabe que el riesgo de cerrar una empresa está siempre latente y que a diario una gran cantidad de empresas terminan sus operaciones independientemente de su edad. Es por ello que resulta importante conocer la edad o edades en que una mayor cantidad de empresas tiene que cerrar sus negocios (Morales, 2012).

Este análisis es particularmente relevante para una industria en constante evolución, como la hotelera, ya que existe una cada vez mayor competencia frente a los negocios establecidos, como las aplicaciones móviles. Entonces, el hecho de que se impulse el establecimiento de nuevas unidades de negocio de alojamiento en los pueblos mágicos de Coahuila contribuirá a generar un mayor análisis demográfico de la realidad empresarial hotelera de estos lugares. Y esto también es relevante porque, como afirman Bartelsman y col. (2003): “muchas firmas pierden

la batalla cada año, mientras un número similar de firmas entran al ruedo. Dentro de la población de establecimientos, las probabilidades de supervivencia para muchas pequeñas y pocas grandes empresas cambian en el tiempo... como resultado, aun en industrias en expansión, muchos negocios experimentan un declive sustancial, y en industrias en contracción no es común encontrar unidades en rápida expansión”.

El análisis demográfico aplicado a las empresas va más allá de estimar ciertos indicadores. Es decir, en la medida en que se conozcan más datos de los negocios, mayor será el impacto en otras áreas, como el empleo, ya que se ha documentado que “las empresas nuevas que entran al mercado y que logran sobrevivir hasta cinco años explican el grueso de la creación neta de empleo” (Fariñas y Huergo, 2015), por lo cual es muy relevante estudiar la dinámica de la industria hotelera en los pueblos mágicos de Coahuila, y analizar en qué medida contribuyen con este indicador considerando, por ejemplo, la variable edad. Adicional al efecto del empleo, Ahmad y Vale (2005) señalan que “altas tasas de creación de negocios generalmente se asocian al crecimiento económico, la creación de empleos y reducción de la pobreza a través del incremento de la productividad e innovación”.

En conclusión, el estudio de la dinámica empresarial desde un punto de vista demográfico aporta elementos necesarios para ampliar la discusión sobre la creación, permanencia y consolidación de un negocio, en este caso, de los hoteles en los pueblos mágicos de Coahuila, en donde se espera un crecimiento importante a partir del nombramiento de Pueblo Mágico que cada uno de los siete municipios recibió en distinto tiempo.

3. Estrategia metodológica

El objetivo general de investigación en este artículo consiste en analizar el entorno empresarial y la dinámica de los negocios en la industria hotelera en los Pueblos Mágicos de Coahuila desde una perspectiva sociodemográfica. El alcance

de esta investigación es cuantitativo, transversal y descriptivo, en la medida en que se busca caracterizar las principales empresas orientadas a este sector económico.

Respecto al lugar y temporalidad del estudio, este proyecto se llevó a cabo durante el 2021. La investigación se realizó mediante trabajo de campo en el periodo mayo a octubre en los siete pueblos mágicos que existen en el estado de Coahuila, los cuales son: Arteaga, Candela, Cuatro Ciénegas, Guerrero, Muzquiz, Parras de la Fuente y Viesca.

Dado que se buscaba obtener información sobre la industria hotelera, la recolección de datos consistió en acudir presencialmente a todos los establecimientos catalogados como hoteles, moteles, hostales u hoteles-boutique localizados en cada uno de los pueblos mágicos. Es decir, la unidad de análisis para esta investigación fueron todos los negocios establecidos identificados como tal, lo que excluye de este proyecto a otras formas de hospedaje y alojamiento en los pueblos mágicos, como casas en renta, plataformas de hospedaje como AirBnb, u opciones de campamento al aire libre.

En cada unidad de alojamiento, se aplicó un cuestionario de trece preguntas en donde se indagó sobre distintas características del establecimiento. Para efectos de esta investigación, se describirán principalmente las variables de: edad, año de nacimiento, generación, empleo y porcentaje de ocupación. La selección de estas variables se encuentra en concordancia con lo que se ha desarrollado en otras investigaciones sobre demografía empresarial (Fariñas y Huergo, 2015; Ahmad, 2006), principalmente en Europa y desde la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico.

La variable *edad* se mide como el número de años de vida de un negocio desde su nacimiento hasta un determinado corte en el tiempo, que en este caso será considerado el año 2021. Los hoteles en cada pueblo mágico serán clasificados según las categorías especificadas por Fariñas y Huergo (2015) en su estudio sobre la demografía empresarial en España, las cuales son: entrantes, de 0 a 2 años;

jóvenes, de 3 a 5 años; maduras, de 6 a 10 años; y viejas, que serán los hoteles con más de 10 años en cada pueblo mágico.

La variable de *generación* se refiere a la población de negocios que nació en un año determinado y se medirá como el total de hoteles nuevos por año a partir del nombramiento de pueblo mágico. Esto implica que el estudio del nacimiento empresarial se realiza mediante un análisis por cohorte, el cual es uno de los conceptos más utilizados en la demografía, y que se define como “un conjunto de individuos que han vivido un acontecimiento similar en el transcurso de un mismo periodo de tiempo. El tipo de cohortes más corriente en demografía es el que se refiere a individuos que han nacido durante un periodo de tiempo específico, generalmente un año calendario: estas cohortes se denominan generación” (Welti, 1997, p. 57).

La variable de empleo se relaciona con la demografía empresarial en la medida en que, a mayor cantidad de nacimientos, se espera un crecimiento en el número de empleos, lo que beneficia al sector económico de referencia. Un estudio de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE, 2017, p. 10), demostró que “las pequeñas y medianas empresas contribuyen significativamente al crecimiento del empleo en la región y puede ser estimulado mediante el adecuado conjunto de condiciones regionales relacionadas con la gobernanza local, disponibilidad de recursos y la educación”. En este sentido, también se calcula el total de empleo generado por los hoteles entrevistados y, con base en el número de trabajadores, se agruparán en micro (de 0 a 10 trabajadores), pequeñas (de 11 a 50 personas) y medianas (de 51 a 250 empleados), según la clasificación de INEGI (2020).

La última variable que también se analizará consiste en el porcentaje de ocupación. Este indicador se refiere al total de habitaciones ocupadas en fin de semana por cada hotel en los pueblos mágicos del estado. La ocupación promedio es un indicador clave para reconocer la actividad de la industria hotelera y

determinar el dinamismo que tiene el turismo en cada pueblo mágico, lo que repercute en la creación o no de nuevas instalaciones hoteleras.

Finalmente, es importante mencionar que, dado que es un análisis exploratorio sobre la dinámica de la industria hotelera en los pueblos mágicos, no se analiza la mortalidad, que es una de las variables demográficas más importantes. Esta ausencia del estudio de la mortalidad se debió en parte a que, al menos en este sector, no se observaron “fallecimientos” de empresas hoteleras, contrario a lo que ocurre con otras industrias cuya esperanza de vida es reducida. Durante la visita a cada uno de los pueblos mágicos lo que se observó fue una tendencia contraria, la de nacimientos consistentes de nuevas empresas hoteleras, como se podrá observar en los resultados, los cuales se presentan en la siguiente sección.

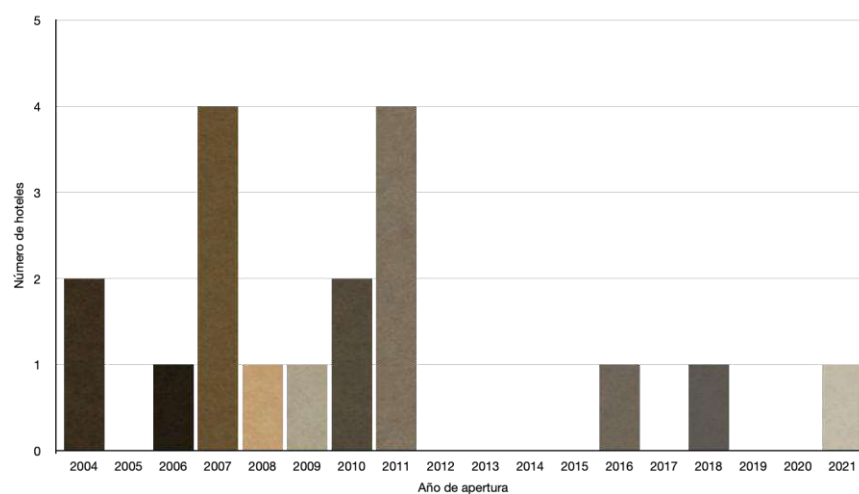
4. Principales resultados

Cada uno de los siete pueblos mágicos en Coahuila presenta características particulares en términos de los atractivos que ofertan a los turistas. Esta heterogeneidad también se observa en la industria hotelera, ya que se encontraron dinámicas empresariales distintas en cada pueblo mágico, lo cual tiene que ver con el tiempo que ha transcurrido desde el nombramiento, la inversión que se realiza en el sector, y el interés que tienen los visitantes por viajar a cada destino. En esta sección se presentan los principales resultados de la industria hotelera de cada pueblo mágico, considerando el orden cronológico en el que recibieron la denominación, por lo que primero se presentarán los datos de Parras de la Fuente (2004), después Arteaga, Cuatro Ciénegas y Viesca (2012), para posteriormente analizar la información de Candela y Guerrero (2015), y finalmente Muzquiz, Coahuila, que recibió su nombramiento en el año 2018.

En primer lugar, Parras de la Fuente es un pueblo mágico que ha sabido orientar y consolidar una industria turística en los 17 años que tiene con esta denominación, todo en favor de la cada vez mayor cantidad de visitantes que viajan a ese destino, particularmente en fin de semana. En este pueblo mágico se encuestaron a 43

hoteles, y se constató que existe una gran heterogeneidad en los establecimientos: el hotel más joven aun no tiene ni el año de operaciones, ya que se inauguró este 2021, mientras que existe uno que tiene más de 300 años en operación. La edad promedio de los hoteles es de 25.6 años, lo cual habla de una industria que ha sabido sobrevivir y mantenerse en el mercado.

Gráfica 1. Unidades de alojamiento en Parras por año de apertura desde el nombramiento de Pueblo Mágico.



Fuente: elaboración propia, 2021.

De los 43 hoteles identificados, 25 de ellos iniciaron operaciones previo a la denominación de pueblo mágico, lo que implica que el 40% de los nuevos hoteles fueron construidos e iniciaron operaciones después de que Parras de la Fuente se convirtió en pueblo mágico. Este impacto no es menor, ya que se trata de una industria en constante crecimiento. La industria de alojamiento en Parras se divide como sigue: 34 hoteles, 6 hostales, 1 hotel boutique y 2 opciones de cabañas.

La gráfica 1 presenta el año en que iniciaron operaciones los 18 hoteles mencionados. Como se puede observar, en el 2007 y el 2011 fueron los años en que más hoteles se crearon, con cuatro en cada año. Destaca también el 2004 y el 2010, en cuya generación fueron desarrollados dos hoteles por año. También es

importante resaltar que en algunos años no se creó ningún establecimiento hotelero, en donde figura principalmente el periodo del 2012 al 2015, y el 2019 y 2020.

La clasificación propuesta permite agrupar a la industria hotelera en Parras como sigue: entrantes, sólo 1 hotel; jóvenes, 2 hoteles; maduros, 4 hoteles; y viejos, los 36 hoteles restantes. Esta categorización confirma que el sector hotelero en Parras de la Fuente ha sabido mantenerse en operación, a pesar de situaciones adversas como crisis económicas o pandemias. Además, el hecho de que la mayoría de los hoteles sean de una antigüedad de más de 10 años implica un nivel de especialización que no se ve en muchos destinos turísticos del mismo tamaño, incluidos algunos pueblos mágicos del mismo estado.

Por su parte, la ocupación promedio de los hoteles en Parras es alta. Como resultado de los cuestionarios levantados entre los propietarios de los establecimientos, se estima un promedio de 87% de ocupación hotelera en fin de semana. Esto habla de una industria en constante demanda por parte de los visitantes que llegan a este destino desde estados circunvecinos, particularmente de Nuevo León, no solo para disfrutar los atractivos enológicos, sino también para un mercado creciente de eventos sociales en el pueblo.

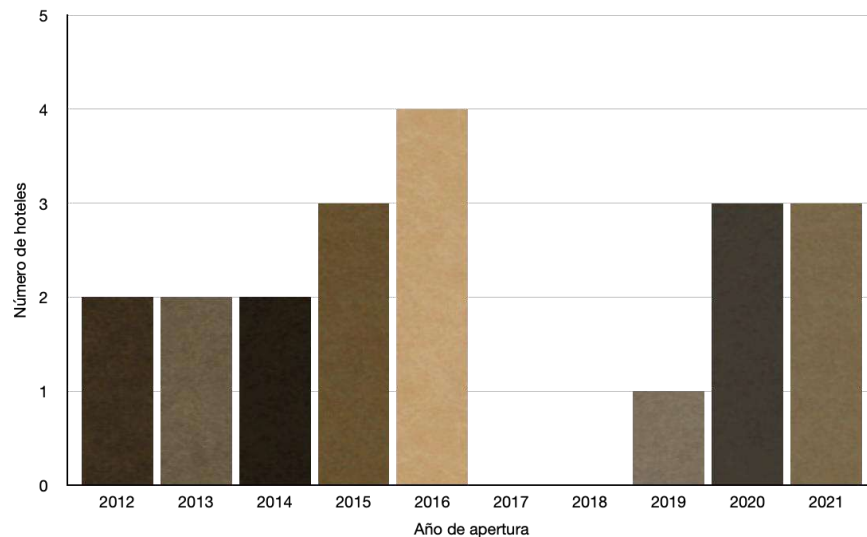
Esta dinámica empresarial tiene repercusiones importantes en el empleo. Al cuestionar a los hoteles sobre esta variable, un hallazgo relevante fue el cambio positivo en el número de empleados en el periodo entre el inicio de operaciones a la actualidad. En total, con la información proporcionada por las unidades de alojamiento, se concluye que 528 personas trabajan actualmente en los 43 hoteles del pueblo mágico. Este hallazgo es significativo por las condiciones de pandemia que aun se vive y que afectó de manera importante a la industria turística en México y el mundo. Según el número de empleos, los hoteles en Parras se pueden dividir de la siguiente manera: microempresas, 31; pequeñas empresas, 11; y medianas empresas; 1. Este resultado muestra que los hoteles creados y en operación en Parras aun se caracterizan por ser negocios pequeños que atienden una demanda

de visitantes que en promedio pernoctan no mas de dos noches en el pueblo mágico.

En suma, en Parras se ha consolidado una industria hotelera diversa que atiende a distintos mercados y perfiles turísticos.

Contrario a lo que sucede en Parras, el pueblo mágico de Arteaga presenta una situación particular. El nombramiento que obtuvo este destino ubicado en el sureste de Coahuila esta delimitado a la cabecera municipal, en donde se encuentra el Palacio Municipal y las cuadras aledañas. Sin embargo, la industria hotelera no esta concentrada en ese sitio. Arteaga es conocido por su infraestructura hotelera ubicada en el entorno natural de la sierra, lo que ha permitido la creación de empresas de alojamiento en el formato de cabañas, principalmente, y que también ha tenido incrementos significativos. En total se lograron encuestar a 40 unidades de alojamiento en Arteaga, 37 de los cuales son cabañas, 2 hoteles y 1 negocio en el formato de *glamping*. Los datos sobre la generación a la que pertenece cada establecimiento se presentan en la gráfica 2.

Gráfica 2. Unidades de alojamiento en Arteaga por año de apertura desde el nombramiento de Pueblo Mágico.



Fuente: elaboración propia, 2021.

Los datos del pueblo mágico de Arteaga señalan que el 50% de los nuevos establecimientos fueron creados a partir del nombramiento de pueblo mágico, lo que habla de un impacto importante en esta industria impulsada por una mayor cantidad de turistas que visitan Arteaga. La mayor cantidad de aperturas ocurrió en el periodo 2012 al 2016, con 12 negocios de cabañas y 1 hotel. A pesar de la contingencia por Covid-19, entre 2020 y 2021 se abrieron seis nuevos negocios de alojamiento.

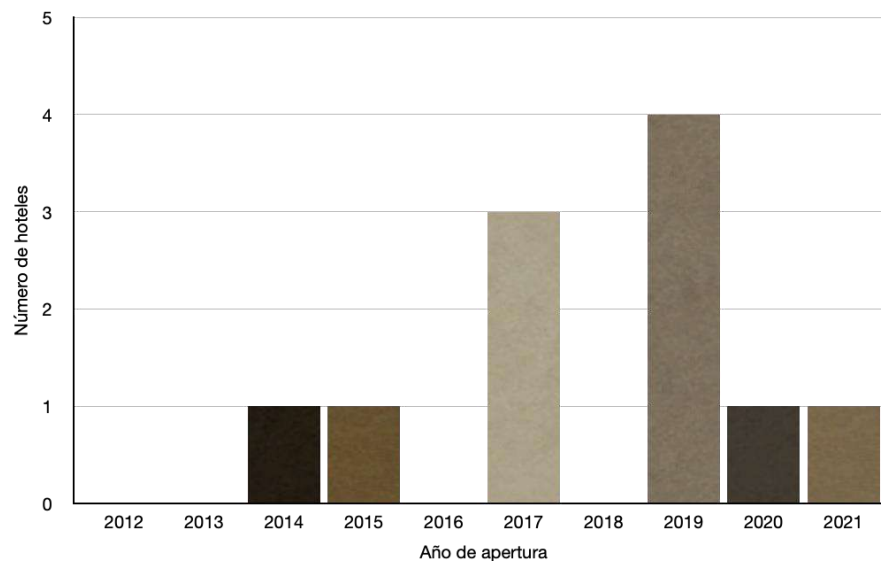
La edad promedio de estas empresas es de 9.87 años, una industria relativamente joven que ha sabido mantenerse en el tiempo y que continúa en crecimiento para recibir a los visitantes que optan por Arteaga como un adecuado destino de naturaleza. Según el cálculo de la edad de los negocios de hospedaje en este pueblo mágico, es posible categorizarlos de la siguiente manera: entrantes, 7 unidades; jóvenes, 4 establecimientos; maduros, 11 hoteles; y viejos, 20 empresas. En este pueblo mágico también se percibe una tradición hotelera de varios años, ya que la mitad de las empresas de todo el sector tiene más de 10 años.

La dinámica empresarial ha generado un total de 445 empleos en todas las unidades de alojamiento, aunque es importante destacar que un solo centro vacacional concentra la mayor cantidad de personal ocupado, por sus dimensiones e importancia regional, Bosques de Monterreal. Según el personal ocupado, la industria hotelera en Arteaga se divide de la siguiente manera: microempresas, 30 hoteles, los cuales representan la mayoría; pequeñas empresas, 9 negocios; y medianas, 1, precisamente el complejo denominado Bosques de Monterreal.

Un pueblo mágico que también obtuvo el nombramiento en 2012 es Cuatro Ciénegas, cuyo crecimiento en el sector hotelero es evidente. Los datos recolectados, presentados en la gráfica 3, indican una dinámica desigual en los nueve años que tiene con el nombramiento. Actualmente existen 24 establecimientos comerciales dedicados al hospedaje, entre hoteles, hostales y cabañas: 11 de estos negocios iniciaron operaciones a partir de la denominación de

pueblo mágico, es decir, el 45% de las empresas de alojamiento fueron creadas como resultado de la dinámica turística creciente de Cuatro Ciénegas.

Gráfica 3. Unidades de alojamiento en Cuatro Ciénegas por año de apertura desde el nombramiento de Pueblo Mágico.



Fuente: elaboración propia, 2021.

La mayor cantidad de aperturas ocurrió en el año 2019, cuando abrieron 3 hoteles y 1 negocio de cabañas, mientras que la generación a la que pertenecen más empresas es 2017, con 3 hoteles que iniciaron operaciones ese año. Aún en el periodo de pandemia, entre 2020 y 2021, fueron creados dos hoteles, uno por año.

Según la edad cumplida, los hoteles se clasifican como siguen: seis entrantes; tres empresas jóvenes; dos maduras y 13 hoteles considerados *viejos*, según las categorías descritas en el apartado metodológico. Con esta información se puede confirmar que la industria hotelera en Cuatro Ciénegas también tiene una tradición importante en el municipio, y que el nombramiento de pueblo mágico contribuyó a la creación de más hoteles.

Este entorno hotelero en Cuatro Ciénegas suma 428 habitaciones, el cual genera más de 400 empleos y cuenta con una alta ocupación del 80% cada fin de semana. Según el número de trabajadores, 18 de los 24 establecimientos, la gran mayoría, son microempresas, mientras que cinco hoteles son pequeñas empresas, y solo 1 es mediana.

Un tercer pueblo mágico que obtuvo su nombramiento en el año 2012 fue Viesca. A pesar de que han transcurrido casi 10 años desde la denominación, en este pueblo mágico la dinámica hotelera no ha logrado despuntar. El trabajo de campo realizado en Viesca constató que únicamente existen dos hoteles en operación, ambas microempresas, y solamente uno de ellos inició operaciones en el año 2021, con una baja ocupación declarada del 20%. El otro hotel tiene más de 20 años en funcionamiento, y sí ha visto un impacto positivo desde el nombramiento de pueblo mágico, ya que declara que cada fin de semana se ocupa el 100% de las 11 habitaciones disponibles en el negocio. Este entorno de negocios en Viesca es relevante en la medida en que es necesario analizar los principales factores que pudieran estar incidiendo en esta realidad de bajo crecimiento en las empresas hoteleras, lo cual puede ser objeto de estudio en un trabajo posterior.

Después de 2012, tuvieron que pasar tres años para que surgieran nuevos pueblos mágicos en Coahuila, ya que en 2015 Candela y Guerrero obtuvieron dicho nombramiento. En ambos casos, y al igual que Viesca, la industria hotelera no crecido al mismo ritmo que Arteaga, Parras o Cuatro Ciénegas. En el caso de Candela, a pesar de que existen viviendas que ofrecen servicios de hospedaje, las opciones de alojamiento formal o comercial se limitan a tres hoteles, y solo uno de ellos fue creado recientemente, en el 2019, que tiene dos habitaciones y es administrado por la misma familia propietaria. Los otros dos tienen una importante tradición en el pueblo y se han mantenido activos. Se tratan de microempresas de menos de 10 empleados. Esto permite concluir que, para el caso de Candela, al ser también un pueblo pequeño, no ha presentado la misma dinámica hotelera en comparación con los más grandes, como Parras, Cuatro Ciénegas o Arteaga, ya

que no se ha invertido en nuevas instalaciones de hospedaje en los seis años que tiene Candela de ser pueblo mágico.

El caso de Guerrero es similar a Candela y Viesca. Los datos recabados en ese pueblo mágico permiten concluir que solo existe una opción de hospedaje, y se trata de un establecimiento en el formato de cabañas creado en el año 2020, es decir, se trata de un negocio nuevo, por lo que en los seis años desde que fue denominado pueblo mágico, en Guerrero no existían opciones adicionales de alojamiento formal.

Finalmente, sobre el caso de Muzquiz, que ha sido el último pueblo mágico en obtener dicha denominación en el 2018, es posible afirmar que ya contaba con una cierta infraestructura hotelera desde hace varios años. De los 10 hoteles establecidos en Muzquiz, siete de ellos ya existían antes del nombramiento de pueblo mágico, incluso algunos con más de 30 años de antigüedad y que continúan en operaciones. Para efectos de esta investigación, se encontró que, desde el 2018, se han aperturado únicamente 3 nuevos hoteles: uno en 2019 y dos en 2020. Según la edad de estos hoteles, tres son entrantes y siete son viejos. En total, todos los hoteles indicaron tener una alta ocupación los fines de semana de alrededor del 86%, generando 76 empleos dentro de sus instalaciones y caracterizados por ser microempresas, de menos de 10 empleados.

Conclusión y discusión

Los siete pueblos mágicos de Coahuila representan un sistema turístico con gran potencial de crecimiento. Ya sea turismo cultural, enológico, de aventura, deportivo, gastronómico, de convenciones, histórico o de esparcimiento, la oferta cada vez mas variada de cada pueblo mágico contribuye a fortalecer y consolidar su permanencia con dicho nombramiento. El reto es grande, puesto que cada vez existe mayor competencia para atraer turismo regional o nacional en un país con una gran riqueza turística, como México.

El objetivo principal de esta investigación se formuló a partir de un análisis que se pretendió realizar de la realidad empresarial de cada pueblo mágico,

particularmente del entorno hotelero. El supuesto detrás de este objetivo es que se esperaría un impacto positivo en cada pueblo mágico a partir de su denominación, lo que repercutiría en un mayor número de establecimientos de hospedaje para ampliar la oferta de habitaciones y satisfacer la demanda turística.

Después de analizar los datos recabados en cada unidad de hospedaje en los pueblos mágicos del estado, es posible resaltar tres conclusiones. La primera es que, con los datos demográficos de los hoteles, como su edad, generación y población total, existen dos grupos de pueblos mágicos en Coahuila. El primero corresponde aquellos con una mayor dinámica comercial en el ramo hotelero, en donde se evidenció mayores aperturas de hoteles, moteles, hostales y cabañas, y por lo tanto con un mayor impacto en el empleo. A este grupo pertenecen Parras de la Fuente, Cuatro Ciénegas y Arteaga, a donde siguen llegando las inversiones en este rubro. El segundo grupo se caracteriza por una ausencia importante de nuevos hoteles, a pesar de que han pasado algunos años del nombramiento. En general se trata de los pueblos mágicos más pequeños del estado, como Viesca, Candela y Guerrero, en donde aún no se alcanza a visualizar un impacto positivo del nombramiento, expresado en mayores inversiones en la industria hotelera, ya que sólo se ha inaugurado un hotel en cada pueblo mágico.

La segunda conclusión es que, prácticamente, en todos los pueblos mágicos se observa una alta ocupación hotelera cada fin de semana. En esta variable no hay diferencias por pueblo mágico, ya que todos se encontró que la ocupación promedio ronda el 80%. Este indicador tiene múltiples significados: uno de ellos es que los pueblos mágicos de Coahuila sí representan opciones de esparcimiento para los visitantes que deciden pasar un fin de semana en cualquiera de los siete pueblos mágicos, para conocer, experimentar y disfrutar de nuevas experiencias que se han ido creando en cada uno de ellos. Además, el hecho de que el indicador promedio de todos los pueblos mágicos sea del 83%, también debe ser un aliciente que impulse más inversiones en este rubro, particularmente en los lugares en donde aun no es tan visible este impacto positivo del turismo.

Finalmente, como tercera conclusión es importante resaltar las características de los hoteles. La mayor parte de ellos son micro y pequeñas empresas, ya que el 96% de los establecimientos encuestados dan empleo a menos de 50 personas, un hotel a 100 personas y dos empresas a más de 200 personas, los cuales son los complejos hoteleros más grandes del estado ubicados en los pueblos mágicos de Coahuila.

Agradecimientos

La información recabada en esta investigación fue posible gracias al financiamiento recibido por el Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP), por lo que se extiende un agradecimiento especial por la aprobación de este proyecto.

Referencias bibliográficas

- Aguirre, L., Tobón G. y Mendoza R. (2018). *Dinámica de las regiones de Coahuila: entre las fuerzas de la cuarta revolución industrial, el asalto a sus recursos naturales y la luchas por el espacio*. México: Universidad Nacional Autónoma de México y Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional A.C.
- Ahmad, N. y Vale, S., (2005). *Moving towards comparable business demography statistics*. OECD, Meeting Document 8.
- Ahmad, N. (2006). *A proposed framework for business demography statistics*. Paris, OECD Publishing.
- Bartelsmann. E., Scarpetta, S. y Schivardi, F. (2003). *Comparative analysis of firm demographics and survival: micro-level evidence for the OECD countries*, en OECD Economic's Department Working Papers No. 348, recuperado de: https://www.oecd-ilibrary.org/economics/comparative-analysis-of-firm-demographics-and-survival_010021066480
- Berger, A. y Udell, G. (1998). The economics of small business finance: the roles of private equity and debt markets in the financial growth cycle. *Journal of Banking & Finance*, 22, 613-673.
- Equihua, G., Messina, S. y Ramírez J.P. (2015). Los pueblos mágicos: una visión crítica sobre su impacto en el desarrollo sustentable del turismo. *Revista Fuente Nueva Época*, Año 6, núm. 22, agosto-octubre 2015.

- Fariñas, J. y Huergo, E. (2015). *Demografía empresarial en España: tendencias y regularidades*, España, Fedea y Popular.
- Fernández, A. (2016). Una revisión del programa Pueblos Mágicos. *Revista Cultur*, año 10, núm. 1, 4-34.
- García, D. y Guerrero, H. (2014). El programa Pueblos Mágicos: análisis de los resultados de una consulta local ciudadana. El caso de Cuitzeo, Michoacán, México. *Economía y Sociedad*, vol. XVII (31), 71-94.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2016). Esperanza de vida de los negocios en México. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/temas/evnm/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. Recuperado de: <https://censo2020.mx/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2020). Estadísticas a propósito del día de las micro, pequeñas y medianas empresas. Datos Nacionales. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2020/MYPIMES20.pdf>
- López, L., Valverde, C., Fernández A. y Figueroa M. (2015). *Pueblos Mágicos. Una visión interdisciplinaria*. México; Universidad Autónoma Metropolitana y Universidad Nacional Autónoma de México.
- Morales, R. (2006). Demografía de negocios en México. *Estudios Demográficos y Urbanos*, Vol. 27(1), 201-225.
- Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (2017). *The geography of firms dynamics: measuring business demography for regional development*. Paris, OECD Publishing.
- Secretaría de Turismo (2020). *Guía de incorporación y permanencia de los Pueblos Mágico*. México: Secretaría de Turismo.
- Shaadi R., Pulido, J. y Rodríguez I. (2017). El producto turístico en los Pueblos Mágicos de México. Un análisis crítico de sus componentes. *Revista de Estudios Regionales*, núm. 108, 125-163.
- Smith, S. y Morrison, P. (2005). "Small-area and business demography", en Poston, Dudley y Michael Micklin (eds.), *Handbook of population*. New York, Springer Publishers.
- Welti, C. (1997). Demografía I. México, Programa Latinoamericano de Actividades en Población e Instituto de Investigaciones Sociales, UNAM.

Modificación superficial de PET reciclado con plasma para el tratamiento de fenoles en aguas residuales: revisión de conceptos.

Surface modification of recycled PET with plasma for the treatment phenols in wastewater: review of concepts

Reyna Rosaura Guadalupe Orsua Gaona ¹, Rosa Idalia Narro Céspedes², Nancy Verónica Pérez Aguilar ³, Miriam Paulina Luévanos Escareño ⁴, Luis Fernando Ricardo Mora Cortés ⁵.

^{1,2,3} Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ciencias Químicas, Ing. J. Cárdenas Valdez S/N, República, 25280, Saltillo, Coahuila, México.

⁴ Universidad Autónoma de Coahuila Campus Torreón, Facultad de Ciencias Biológicas, Carretera Torreón Matamoros Km. 7.5, Ejido el Águila, 27275, Torreón, Coahuila, México.

⁵ Enrique Reyna H. No. 140, San José de los Cerritos, 25294, Saltillo, Coahuila, México.

Correspondencia para autor: Rosa Idalia Narro Céspedes

Universidad Autónoma de Coahuila

Correo electrónico: rinarro@uadec.edu.mx

(044) 844 880 97 97

RESUMEN

El alto consumo en México de bebidas embotelladas ha generado una gran cantidad de residuos plásticos que son desechados deliberadamente en espacios libres y comunes en la ciudad y en el campo. Estas botellas son fabricadas con el material polimérico polietiléntereftalato (PET) y tardan más tiempo en degradarse en el medio ambiente, contribuyendo con la contaminación. Por tal razón se han buscado diferentes alternativas de reciclaje para disminuir el impacto ecológico que tienen estos residuos. Una alternativa propuesta para este cometido se puede analizar desde el punto de vista conceptual, y se trata de la modificación superficial de las botellas de PET reciclado, a través de una tecnología limpia, como lo es el plasma. Después de ser modificado a esta escala, el PET puede usarse como sustrato con un método biológico que consiste en la inmovilización de enzimas, entre las que se encuentran las enzimas lacasas, las cuales poseen la capacidad de degradar compuestos orgánicos. Algunos de estos son los fenoles, los aromáticos y los colorantes que están presentes en aguas residuales y actúan como contaminantes perjudiciales para la salud del hombre. Esta revisión presenta los conceptos básicos que ayudan a explicar el fundamento del plasma como alternativa propuesta para reciclar las botellas de PET y el uso de esta tecnología para contrarrestar la presencia del contaminante fenol, en aguas residuales ya que esta molécula es conocida por su alto grado de toxicidad.

Palabras clave: fenol, polietiléntereftalato, plasma, enzima lacasa.

ABSTRACT

The high consumption in Mexico of bottled beverages has generated a large amount of plastic waste that is deliberately discarded in free and common spaces in the city and in the countryside. These bottles are made with the

polymeric material polyethylene terephthalate (PET) and take longer to degrade in the environment, contributing to pollution. For this reason, different recycling alternatives have been sought to reduce the ecological impact of these residues. An alternative proposed for this purpose can be analyzed from a conceptual point of view, and it is the surface modification of recycled PET bottles, through a clean technology, such as plasma. After being modified on this scale, PET can be used as a substrate in a biological method that involves the immobilization of enzymes, including laccase enzymes, which have the ability to degrade organic compounds. Some of these organic compounds are present in wastewater and act as contaminants that are harmful to human health. The phenol molecule, known for its high degree of toxicity, is one of these dangerous pollutants. This review presents the basic concepts that help explain the basis of this proposed alternative to recycle PET bottles, and in turn, counteract the presence of the toxic contaminant phenol in wastewater.

Keywords: phenol, polyethylene terephthalate, plasma, laccase enzyme.

INTRODUCCIÓN

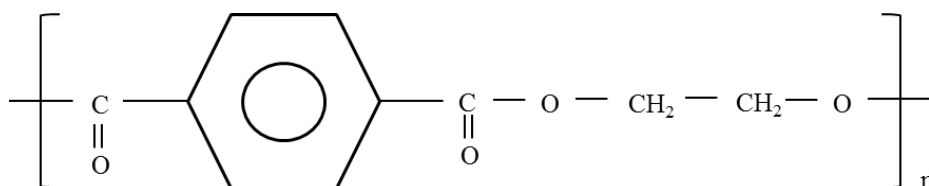
La Comisión de Medio Ambiente y Recursos Naturales estimó que en México se desechan 90 millones de botellas de refrescos y agua de manera insalubre, contaminando vías públicas y ecosistemas naturales. Las botellas utilizadas en la industria embotelladora son generalmente fabricadas con polietiléntereftalato (PET). Según datos proporcionados por el Sitio Oficial Honorable de la Cámara de Diputados, nuestro país se ubica como el segundo consumidor de refresco a nivel mundial y como el primero de agua, con 722 mil toneladas al año de PET (Cámara de Diputados Boletín No. 3469, 2017). Como resultado del alto consumo de estas botellas y la falta de conciencia por el cuidado ambiental por parte de los consumidores, las botellas de PET se han convertido en una alarma ecológica

importante, y al no ser desechados de manera adecuada, no es posible reciclarlos en su totalidad. Es por lo anterior que ha nacido un gran interés por intentar disminuir la cantidad de residuos plásticos que se generan diariamente no solo en la ciudad de México, sino en todo el país. Algunas asociaciones como la de Ecología y Compromiso Empresarial (ECOCE ®) han surgido para aportar alternativas que mejoran la sustentabilidad ambiental, a través de la difusión de programas de acopio y reciclaje, campañas de comunicación, campañas de limpieza y eventos informativos para concientizar a la sociedad sobre la importancia de desarrollar una educación que permita mejorar los hábitos de consumo y post-consumo, y de esta manera evitar que se continúen disponiendo los residuos plásticos de manera insalubre. Dicha asociación trabaja bajo el esquema de la Ley General de Prevención y Gestión Integral de los residuos (LGP y GIR), es subsidiada por la industria de productos de consumo y se une en esfuerzos a la iniciativa privada y al gobierno. Inicialmente esta organización comenzó con el reciclaje de PET, porque como se mencionó anteriormente, es uno de los plásticos más desechados en México, pero se ha extendido hacia otros materiales como el polietileno de alta y baja densidad (PEAD-PEBD), el polipropileno (PP), vidrio y cartón multi laminado, entre otros (ECOCE ®, 2020). La finalidad de reciclar este material es disminuir la contaminación ambiental que genera, puesto que las botellas de PET tardan más de 500 años en degradarse y el reciclaje podría ser el inicio del camino de la transformación de estos residuos plásticos en aplicaciones que ayuden a resolver otros problemas ambientales de gran importancia, como es el caso de la contaminación de aguas residuales con compuestos químicos tóxicos, dentro de los cuales se pueden encontrar los compuestos fenol, pero, ¿cómo una botella de PET reciclada podría usarse para degradar estos compuestos? Bien, en este trabajo se presentan los conceptos necesarios para comprender dicha transformación de estas botellas.

CONTENIDO

Polietiléntereftalato (PET)

El polietiléntereftalato es un material polimérico que pertenece a la clasificación de los poliésteres. La unidad repetitiva que forma su estructura química se ilustra en la [Figura 1](#).



[Figura 1](#). Estructura del polietiléntereftalato (PET).

Fuente: Elaboración propia.

Este polímero es obtenido a través de un proceso de polimerización por adición llamado policondensación, donde se hace reaccionar el ácido tereftálico y el etilenglicol a través de una esterificación, el resultado es un sub-producto llamado BETH (bis 2-hidroxietileno), que actúa como monómero y al repetirse sucesivamente forma el PET. Esta síntesis (Villalobos, 2018) se ilustra de manera general en la [Figura 2](#). Una vez que se sintetiza el PET, su producción es llevada a nivel industrial, donde las botellas son fabricadas a través de un proceso que se conoce como inyección por soplado (Río, 2016), y se ilustra en la [Figura 3](#).

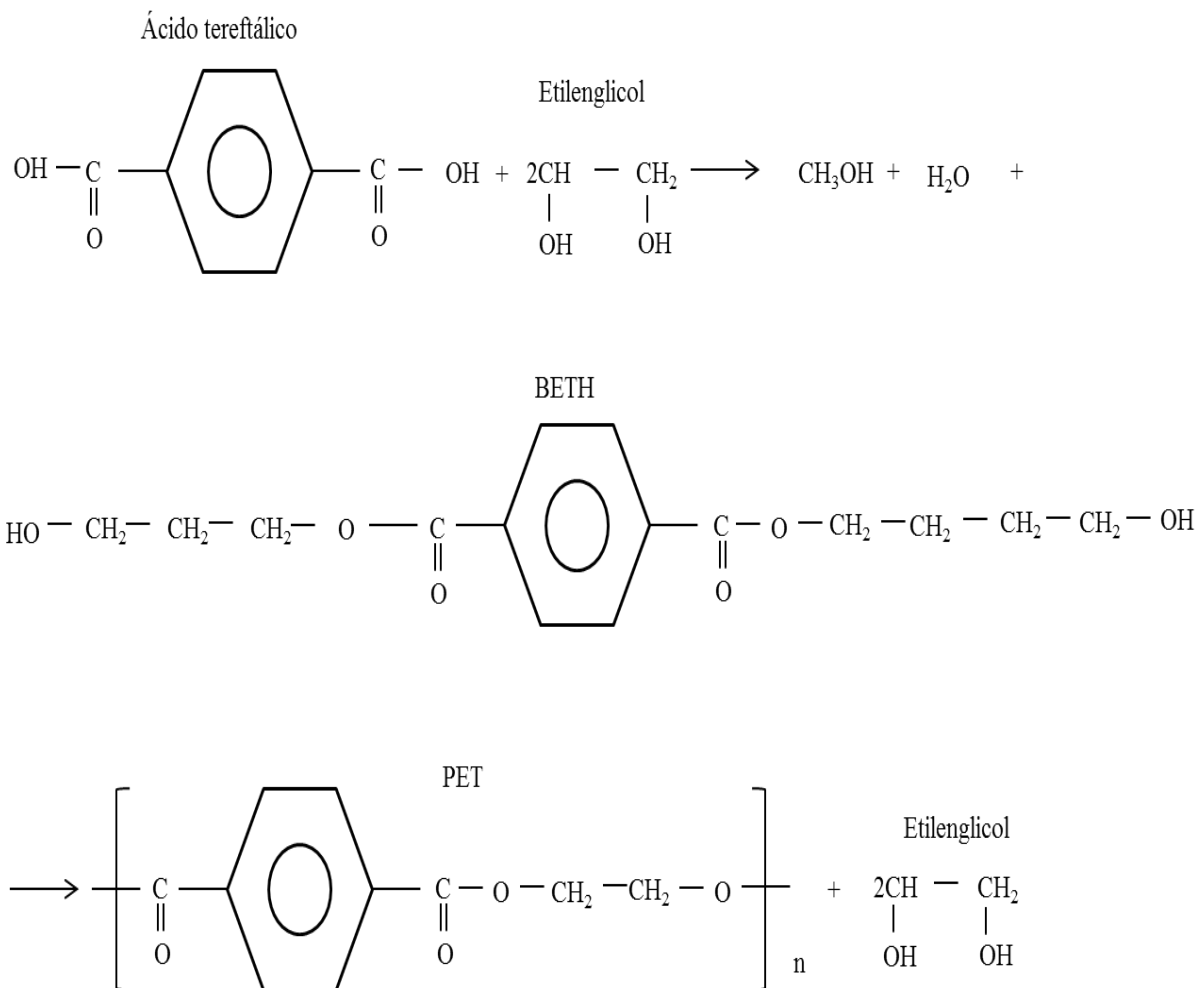


Figura 2. Síntesis de PET.

Fuente: Elaboración propia. Adaptación de proceso de referencia (Villalobos, 2018).

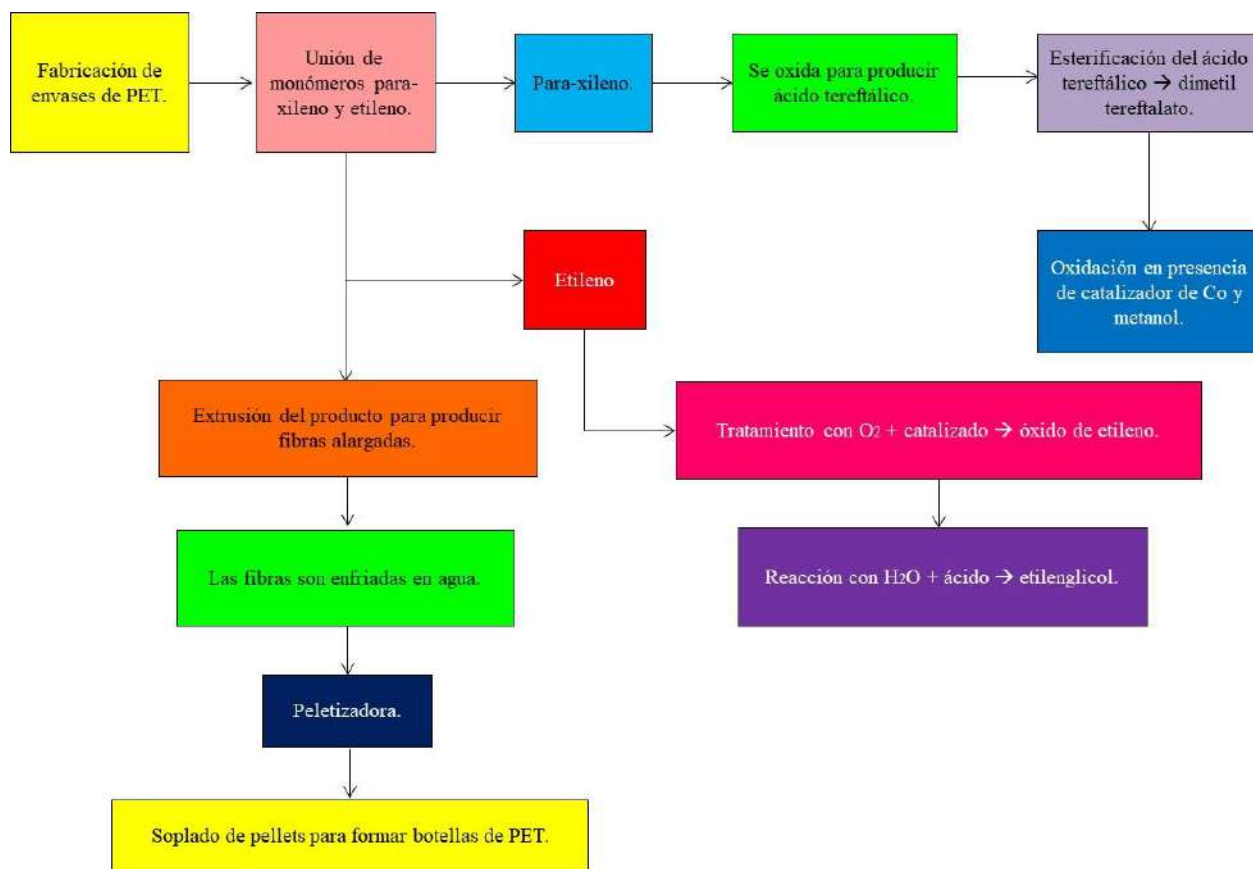


Figura 3. Proceso de obtención de botellas de PET.

Fuente: Elaboración propia. Adaptación de proceso de referencia (Río, 2016).

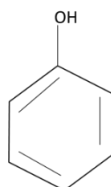
Las propiedades mecánicas del PET se ven influenciadas por diversos factores como son: grado de cristalinidad, procesamiento, orientación estructural y modelado del producto. De acuerdo con el grado de cristalinidad, el PET puede ser amorfo (sin cristalinidad) y semi-cristalino (con poca cristalinidad). Las propiedades mecánicas de ambos tipos de PET se muestran en la Tabla 1 (Nisticó, 2020). Estas propiedades le dan al PET la versatilidad para ser empleado en aplicaciones más específicas, aún después de ser desechado. Por lo tanto, es posible atacar la problemática ocasionada por la contaminación con botellas de PET, al reciclarlas para su posterior transformación.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del PET (Nisticó, 2020).

Propiedad mecánica	Tipo de PET	Valor	Unidades
Módulo de Young	Amorfo	2.8 – 3.0	GPa
	Semi-cristalino	2.8 – 3.1	GPa
Resistencia a la tracción	Amorfo	55 – 60	MPa
	Semi-cristalino	70 - 75	MPa
Alargamiento a la rotura	Amorfo	280 –	%
	Semi-cristalino	320	%
		65-75	

Fenoles

El fenol es la molécula básica de los compuestos fenólicos. Está formada por un anillo aromático (fenil) unido a un grupo hidroxilo (OH), como se muestra en la [Figura 4](#). La molécula fenol constituye la base para una amplia clasificación de fenoles existentes (Peñarrieta y col., 2014), tanto naturales como sintéticos, con múltiples aplicaciones y características.



[Figura 4](#). Estructura química del fenol.

Fuente: Elaboración propia.

Estos compuestos son altamente tóxicos y por lo tanto perjudiciales, ya que se adhieren al organismo, alterando su funcionamiento. La toxicidad de este grupo contaminante está relacionada con la formación de radicales libres y la hidrofobicidad de los fenoles, lo que impacta negativamente su solubilidad y la interacción del compuesto con las células.

Los fenoles son encontrados en residuos de diversas industrias: refinerías, procesadoras de polímeros, farmacéuticas, textiles, petrolera, coquerías, pesticidas, plaguicidas, de cuero, de papel y colorantes (Pardo y col., 2017).

El uso del agua en estas industrias ha provocado un problema ambiental por los desechos químicos que se generan, ya que el fenol es uno de los compuestos más perjudiciales para la salud del hombre, así como para la flora y fauna de mares y océanos. Se estima, que este residuo contaminante es expulsado en un 73% al agua, 0.4% en el suelo y 26% al aire (Mohan y col., 2004). Cuando se lleva a cabo el proceso de cloración en aguas, el resultado es la producción de los clorofenoles, que son aún más carcinogénicos. Debido a lo anterior, es importante la investigación y desarrollo de metodologías eficaces y económicas que eliminen su presencia en aguas residuales, y con esto, los efectos tóxicos que ocasiona.

En la eliminación de fenoles es de vital importancia evaluar de manera cuantitativa la presencia de estos compuestos, por lo que en la norma mexicana NMX-AA-050-SCFI-2001 proporcionada por la Secretaría de Economía (2001), se describe el método para la determinación de fenoles totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Se han desarrollado diversos métodos para la eliminación de fenoles en tratamientos de agua, dentro de los cuales se encuentran la súper cloración, el tratamiento con óxido de cloro o cloramina, la ozonización, la adsorción, la incineración, tratamientos biológicos, electrocoagulación, oxidaciones químicas y degradación microbiana (Hernández, 2015). Así como la coagulación,

intercambio iónico, electrólisis, ósmosis inversa, extracción con solvente, y biodegradación (Gayatri y Ahmaruzzaman, 2014):

Metodologías para el tratamiento de fenoles en aguas

La *coagulación* es un proceso fisicoquímico en el cual se elimina el color y turbidez de partículas coloidales (1-200 μm). Se usan coagulantes orgánicos e inorgánicos y se requiere de pocos minutos para una obtener una mezcla, de la cual se sigue una aglomeración de partículas sedimentadas en flóculos más grandes que asientan eliminando los contaminantes en el lodo formado. En estos procesos se utilizan productos químicos como el sulfato ferroso, el cloruro férrico, sulfato férrico, alumbre, cal, polímeros y combinaciones de los mismos. Un aspecto importante que debe monitorearse es el pH.

El *intercambio iónico* es otro de los métodos conocidos para eliminar fenoles en aguas residuales. En este método se aprovecha la naturaleza ácido débil de los fenoles, y por esta razón este proceso ofrece altos grados de recuperación a bajas concentraciones. Es reversible y las resinas de zeolitas que se usan para llevarlo a cabo pueden regenerarse después de la recuperación de fenoles. Sin embargo, el proceso tiene limitaciones de capacidad y selectividad, y algunas desventajas asociadas a este método incluyen contaminación por cloro y ensuciamiento con bacterias.

En la *oxidación química* los fenoles se pueden degradar en formas más oxigenadas a través de reacciones con agentes oxidantes. Es un proceso altamente eficiente en la degradación de fenoles, en el cual se utiliza ozono, cloro peróxido de hidrógeno, hipoclorito de sodio y permanganato de potasio. En algunos casos se forman productos secundarios ácidos, lo que genera problemas de corrosión. También pueden involucrarse sub-procesos dentro de la oxidación

química, como es la ozonización directa, aire húmedo, oxidación de peróxido de hidrógeno y fotólisis UV. Algunos productos finales idóneos de este proceso son productos simples como el agua y dióxido de carbono, lo que no muestra problemas de contaminación.

La *ozonización* se emplea para la desinfección del agua y se producen radicales hidroxilos (OH) tras la descomposición del ozono (O_3) con OH. Este proceso es útil para aguas residuales con concentraciones muy bajas de entre 1-5 mg/L de fenol. En el método *electrolítico*, la materia orgánica se clasifica en oxidación directa (se da en la superficie del ánodo) y oxidación indirecta (lejos de la superficie del ánodo). Otro método de degradación fenólica es la *ósmosis inversa*, es una tecnología que emplea una membrana que recupera a gran escala de aguas residuales, por lo que requiere un mayor gasto energético. Una desventaja de este proceso es la contaminación de la membrana con bacterias y la sensibilidad a productos químicos, por lo que es necesario un pretratamiento de las aguas residuales.

La *extracción con solvente* es otro método en el cual se da una separación de fase orgánica utilizando solventes inmiscibles con agua. El fenol se extrae después de tratar la capa orgánica o se destila el solvente en caso de que exista gran diferencia entre las temperaturas de ebullición del fenol y del agente de extracción. Se usan disolventes orgánicos como n-hexano, ciclohexano, benceno, tolueno, etilbenceno, cúmeno, ésteres de acetato y metilisobutilcetona. La inevitable formación de una tercera fase provoca que la extracción con solventes genere una contaminación secundaria, lo cual representa su principal inconveniente, acompañado de un alto costo de operación y consumo de energía, además de que no es tan eficiente en la eliminación de niveles traza de contaminantes.

La *adsorción* es útil cuando se trata de bajas concentraciones de fenoles, requiere menor espacio en comparación con los tratamientos biológicos, tiene flexibilidad en su diseño y operación, ofrece menor sensibilidad a la variación del proceso, es de mayor eficiencia, es insensible a contaminantes tóxicos, no forma sustancias nocivas, tiene alta capacidad de adsorción, alta reactividad superficial y es de mayor aplicabilidad puesto que elimina diferentes contaminantes. Este proceso puede ser físico o químico, en el primero se involucran fuerzas débiles reversibles a bajas temperaturas, en el segundo, se necesitan altas temperaturas, mayor energía de activación y proporciona enlaces fuertes irreversibles. El carbón activado es uno de los adsorbentes más usados en aguas residuales y/o de naturaleza biológica, sin embargo, se continúan buscando nuevos adsorbentes alternativos, principalmente constituidos de biomasa.

Por último, en el método de *biodegradación* de compuestos orgánicos se utilizan entidades microbianas para la degradación de fenoles. Las cepas microbianas *pseudomonas putida-fluorescens*, *acinetobacter*, *trichosporon cutaneum* y *candida tropicalis* son capaces de degradar fenol en bajas concentraciones, sin embargo, a altas concentraciones el fenol se torna tóxico e inhibe la tasa de crecimiento de estos microorganismos. Este método es funcional a niveles de concentración de 5-500 mg/L (Gayatri y Ahmaruzzaman, 2014).

Como se han mencionado anteriormente existen diversas técnicas para la remoción de fenoles, que van desde métodos físicos y químicos hasta los biológicos, siendo estos últimos los más eficientes y amigables con el medio ambiente. En el caso de los compuestos simples derivados del benceno, es posible llevar a cabo con estos métodos biológicos una degradación rápida con estos tratamientos. Además, la efectividad de estos tratamientos biológicos nace de la interacción de los componentes enzimáticos presentes en organismos degradadores con el grupo fenol, ya que las enzimas pueden modificar su

estructura y propiedades, actuando como biocatalizadores (Alarcón, 2017). Tomando esta información como antecedente, es importante revisar los conceptos relacionados con el tema de enzimas para la bio degradación del fenol y cómo pueden actuar las botellas de PET para el tratamiento de estas moléculas contaminantes en las aguas residuales.

Enzima Lacasa

La enzima lacasa es reportada por Gianfreda et al. (1999) como una glicoproteína extracelular que contiene cobre y un alto peso molecular y normalmente presentan mayor estabilidad en ambientes con pH alcalinos debido a la inhibición del grupo hidroxilo en el proceso de auto-oxidación (Ramírez y col., 2003). La lacasa reduce el oxígeno molecular a agua y simultáneamente realiza la oxidación de sustratos orgánicos e inorgánicos (Bustamante, 2012).

Este tipo de enzima perteneciente a la familia peroxidasa, se ha empleado para la eliminación del fenol de aguas residuales (Yao y col., 2006). La enzima cataliza la separación de un electrón del grupo hidroxilo presente en el fenol y de esta manera se forman compuestos poliméricos de mayor peso molecular, a través de radicales libres resultantes de la catálisis (Oliva, 2017).

En la [Figura 5](#) se muestra el mecanismo de reacción de la enzima lacasa y los grupos fenólicos, por medio de las siguientes interacciones:

1. Oxidación catalizada de fenoles, controlada por la cinética de la enzima (A).
2. Formación de radicales fenoles (A).
3. Los radicales fenoles se convierten en dímeros (B).
4. Transferencia de electrones, en la cual, se forman radicales oligoméricos (C).
5. Recombinación de oligómeros, aumentando su peso molecular (D).

Al ocurrir una reacción de transferencia de radicales, se regenera un monómero fenólico que la enzima oxida nuevamente y con esto pueden producirse nuevas reacciones de transferencia de radicales (Ghoul y Chebil, 2012).

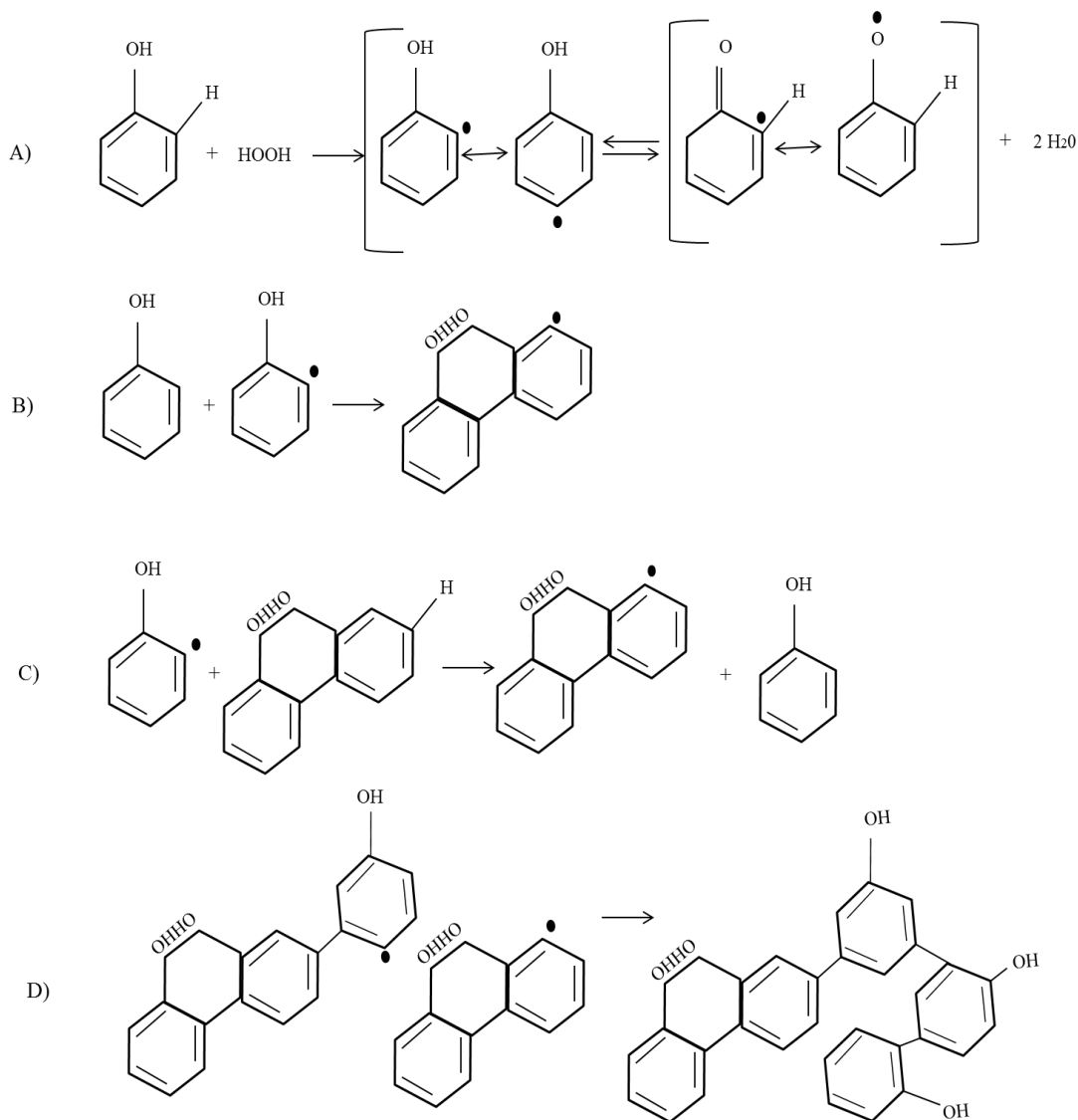


Figura 5. Mecanismo de reacción de la enzima lacasa y el grupo fenol.

Fuente: Elaboración propia. Adaptación de proceso de referencia (Ghoul y Chebil, 2012).

La inmovilización de enzimas es un proceso en el cual se coloca la enzima en un área determinada de un soporte para dar lugar a formas insolubles que retienen su actividad catalítica, y a su vez, dicho soporte puede ser reutilizado de manera repetitiva. Para realizar la inmovilización enzimática, existen métodos de adsorción, unión covalente, entrecruzamiento, encapsulamiento y atrapamiento, aunque los más comunes son los de adsorción, atrapamiento y la unión covalente sobre un soporte, o matriz (Romero y col., 2014; Salazar y col., 2014). En la Tabla 2, se muestran las características generales de los métodos mencionados. La elección del método de inmovilización, depende del tipo de la estructura del soporte y de la enzima, y de las condiciones de reacción.

Un sistema de inmovilización de enzimas debe incluir una enzima, un método de fijación y un soporte. Para elegir un soporte adecuado, es importante considerar algunos factores, como son, la temperatura, el pH, la fuerza iónica, la presión, la agitación y el proceso de separación del soporte y el producto (Ghoul y Chebil, 2012). Estos soportes se pueden clasificar en base a forma, tamaño, propiedades físicas y químicas, como se puede mostrar en la Tabla 3.

Uno de los aspectos importantes a considerar dentro del proceso de inmovilización de enzimas, es la etapa de *activación*. En esta etapa se adiciona un entrecruzante al soporte funcionalizado. Los entrecruzantes son compuestos orgánicos con doble función: reaccionar con el soporte modificado superficialmente, y con la enzima (Nicolás, 2017).

Tabla 2. Métodos de inmovilización de enzimas (Romero y col., 2014; Salazar y col., 2014).

Método de inmovilización de enzimas	Características generales
Adsorción	Es el método más simple. Se forman enlaces débiles (Fuerzas de Van der Waals, interacciones iónicas, interacciones hidrofóbicas y puentes de hidrógeno). Las interacciones entre la enzima y el soporte, son en su mayoría reversibles y no implican una modificación química, por lo que puede presentarse un desprendimiento de la enzima. Este método es susceptible a cambios de pH, temperatura y fuerza iónica.
Atrapamiento.	Puede incluir una unión covalente o no, de la enzima, por lo que es más estable. Está limitado el transporte del analito al sitio activo, pero permite que el material encapsulado se adapte al entorno físico químico de la enzima y el material utilizado para la inmovilización.
Entrecruzamiento.	Es la formación de una estructura 3D, compleja, entre las moléculas de la enzima, utilizando medios químicos y físicos, por uniones covalentes y agentes floculantes, respectivamente.
Unión covalente.	Se da un entrecruzamiento de la enzima con el soporte, a

	<p>través de un enlace más estable y no débil. Este enlace se da entre el grupo funcional del soporte y la superficie enzimática, la cual debe tener presencia de grupos amino. La activación del soporte y su modificación superficial, son necesarios para llevar a cabo este método.</p>
--	---

Tabla 3. Clasificación de soportes para realizar la inmovilización de enzimas (Bustamante, 2012).

Soportes inorgánicos	
<i>Naturales</i>	<i>Sintéticos</i>
Arcillas: bentonita, piedra pómez, sílice.	Óxidos metálicos, vidrio de poro controlado, vidrio no poroso, alúmina y gel de sílice.
Soportes orgánicos	
<i>Naturales</i>	<i>Sintéticos</i>
Polisacáridos: celulosa, almidón, dextranos, agarosa, quitosano.	Poliolefinas: poliestireno.
Proteínas fibrosas: colágeno, queratina.	Polímeros acrílicos: poliacrilatos, poliacrilamidas, polimetilacrilatos.

Los soportes orgánicos dan como resultado pocas cantidades de enzima dispuesta y la elución es continua en sistemas enzima – célula; no son tóxicos, son biocompatibles, fácilmente manipulables de forma química y compatible con las enzimas, gracias a su naturaleza hidrofílica (Romero y col., 2014). Los materiales inorgánicos por su parte son empleados como soportes porque presentan buena resistencia térmica y mecánica, son resistentes a la degradación

de microorganismos, son rígidos y sus poros mantienen su volumen, tamaño y forma constante, lo que favorece la actividad enzimática en estos soportes (Meneau y col., 2020).

Existe un amplio número de investigaciones publicadas recientemente con respecto al uso de la enzima lacasa inmovilizada para dar solución a la problemática del fenol, en las cuales se han propuesto métodos bajo diferentes técnicas de inmovilización en diversos tipos de soportes modificados. En el año 2019, Mokhtar y col. propusieron un nuevo sistema de biodegradación para bisfenol A, usando lacasa inmovilizada en membranas de fibra hueca, dichas membranas fueron modificadas para soportar una inmovilización multicapa de la enzima lacasa, a través de una polimerización de injerto inducida por radiación (Mokhtar y col., 2019). En ese mismo año, Rahmani y col. eliminaron eficientemente 2,4-dinitrophenol de aguas residuales sintéticas y muestras de suelo contaminadas utilizando lacasa libre e inmovilizada en soportes con montmorillonita y zeolita para la descomposición de este compuesto (Rahmani y col., 2019). Wu y col., en 2019 inmovilizaron la misma enzima en una estructura organometálica funcionalizada con grupos amino, mediante métodos de adsorción y unión covalente (Wu y col., 2019). Qiu y col., en el mismo año, por su parte inmovilizaron la enzima sobre nano partículas magnéticas modificadas por líquido iónico, funcionalizado con grupos amino a través de almidón de dialdehído para la biodegradación de compuestos fenólicos (Qiu y col., 2019). En el 2019, Bilal y col. inmovilizaron covalentemente lacasas fúngicas en perlas de quitosano reticuladas con glutaraldehído (Bilal y col., 2019).

En 2020, Liu y col. inmovilizaron la enzima lacasa con una novedosa tecnología de bio-impresión 3D (Liu y col., 2020). Zhang y col., en el mismo año inmovilizaron la enzima lacasa en un sustrato magnético de nano partículas de Fe_3O_4 mediante enlaces covalentes, recubiertas de quitosano como biocatalizador reutilizable para

la degradación de clorofenol (Zhang y col., 2020). Wang y col., en 2020 inmovilizaron lacasa en micro esferas de estructura organometálica magnética de núcleo-coraza para la eliminación de compuestos de etoxilato de alquilfenol (Wang y col., 2020). Zhang y col., en el año 2020 construyeron nano-portadores de carbono magnético a base de esponja luffa, para la inmovilización de lacasas y su aplicación en la eliminación de bisfenol A (Zhang y col., 2020). Como se puede observar en las investigaciones mencionadas, para lograr la inmovilización es necesario que el soporte elegido tenga una superficie compatible que le permita anclarse con la enzima, sin embargo, algunos materiales como el PET, no presentan naturalmente dicha compatibilidad superficial, pero ofrecen propiedades mecánicas idóneas para fungir como soporte, por lo que es recomendable cambiar únicamente las características de su superficie, y para lograr esto, la técnica del plasma es una excelente alternativa.

El plasma como técnica de modificación superficial

El plasma es llamado el cuarto estado de la materia: sólido, líquido, gas y plasma. Se trata de un gas ionizado que contiene electrones, iones, moléculas, átomos y radiación electromagnética. La condición para que pueda identificarse como plasma, es que las especies mencionadas tengan una carga eléctrica neutra. En la Figura 6, se muestra una representación de los componentes del plasma. El tratamiento por plasma tiene la capacidad de modificar las últimas capas de la superficie de los polímeros sin afectar las propiedades de la masa. La modificación que se logra en la superficie se lleva a cabo mediante la aplicación de energía tipo radiofrecuencia, microondas o corriente eléctrica, a un gas.

El plasma se clasifica en dos tipos, el plasma en frío, en el cual el gas es parcialmente ionizado, y el plasma en caliente, donde el gas tiene un alto grado de ionización (Martínez, 2005). El plasma en frío es producido cuando los electrones libres en un gas a baja presión se aceleran en presencia de un campo eléctrico o

magnético. La modificación ocurre cuando se altera la energía y la reactividad química de la superficie del soporte, mediante un mecanismo donde se generan radicales libres y, éstos a su vez, se acoplan con las especies activas del plasma. Es importante mencionar que, dependiendo del tipo de gas, se podrán adherir diferentes grupos químicos a la superficie del polímero, como son grupos hidroxilos, carbonilo, ácido carboxílico, aminos, etc. (Castillo, 2004).

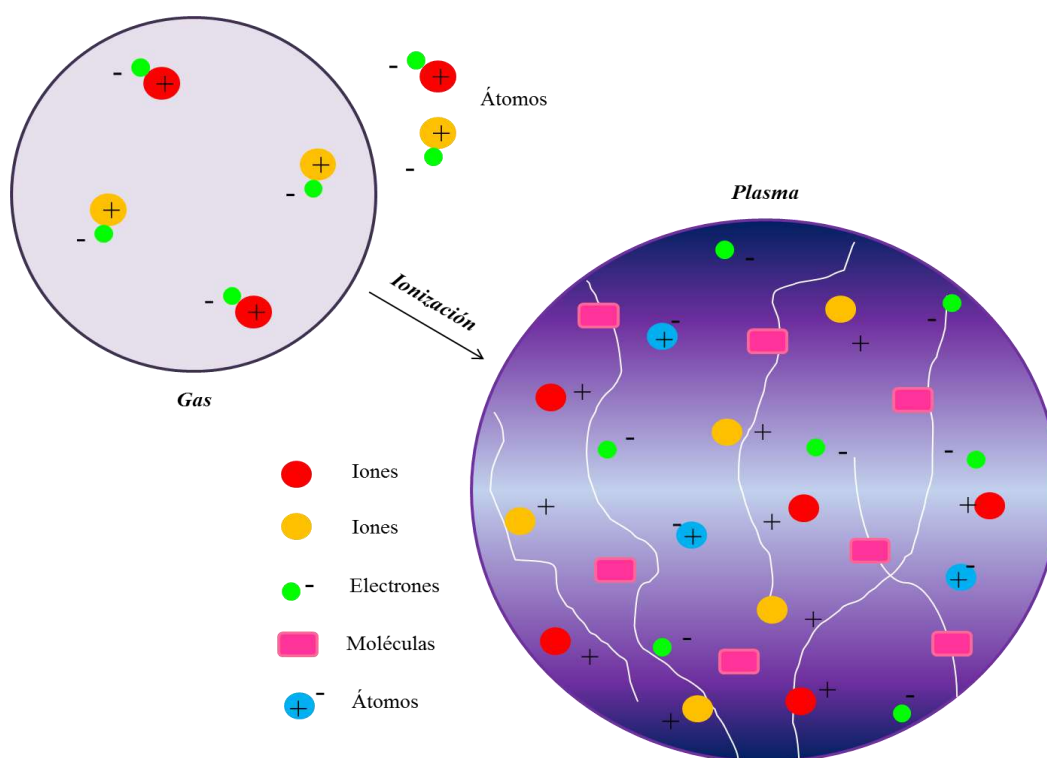


Figura 6. Componentes del plasma.

Fuente: Elaboración propia.

Los polímeros como el PET son inertes químicamente y por tal motivo no tienen facilidad de adherencia con otros compuestos, es por eso que al activar su superficie con plasma es posible cambiar esta condición, ya que el plasma genera radicales libres en el material y al adicionar especies activas que contengan grupos aminos, el PET es funcionalizado con estos grupos aminos. En la [Figura 7](#)

se muestra una representación esquemática de la funcionalización, a manera de ejemplificar este proceso.

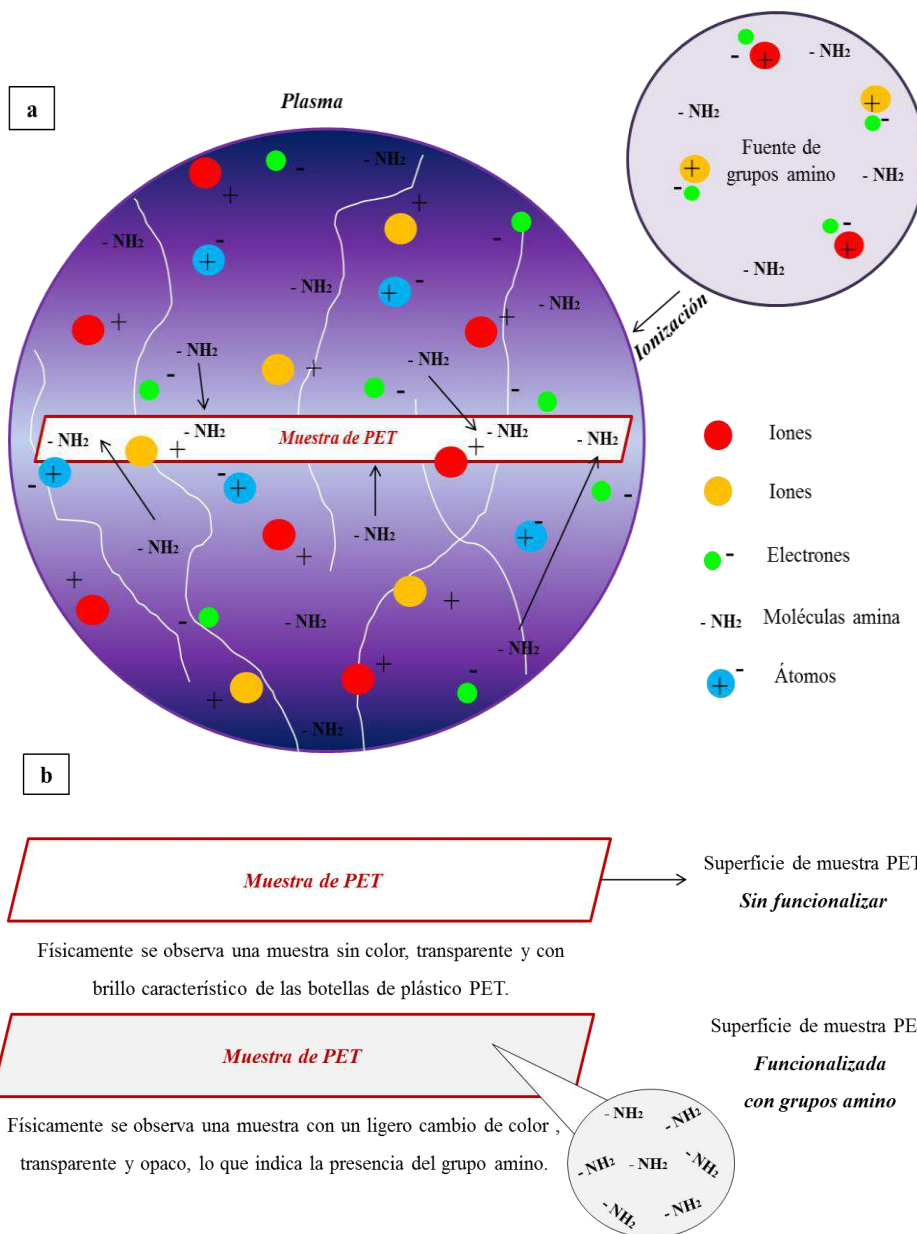


Figura 7. Representación de modificación superficial con plasma: a) muestra de PET en proceso de funcionalización con grupos amina, b) comparación de muestra de PET antes y después de la funcionalización.

Fuente: Elaboración propia.

La técnica de plasma para modificar superficies de materiales poliméricos ha sido ampliamente investigada. En el último año, se han reportado trabajos donde se aplica esta tecnología con diversos objetivos, como es el tratamiento con plasma de oxígeno, con el que se pueden formar diversos grupos de oxígeno, como son los hidroxilos, carbonilos, epoxi, éster y carboxilos, entre otros. Dicho tratamiento se ha utilizado para funcionalizar la superficie del poliestireno (PS) con grupos funcionales determinados para calcular la densidad de átomos de oxígeno disociados, para estudiar la degradación de compuestos orgánicos presentes en el polímero, la formación de nuevos grupos funcionales y una modificación más gruesa de la superficie (Vesel y col., 2021).

Otro polímero modificado con esta técnica es el polieteretercetona (PEEK), el cual fue tratado para cambiar su naturaleza hidrófoba a hidrófila de manera permanente para mejorar y prolongar sus propiedades de humectación y de adhesión superficial (Sundrival y col., 2021). También se ha empleado el plasma para determinar los efectos que tienen diferentes gases en la funcionalización superficial de polímeros como, el poli (metacrilato de metilo) (PMMA) y el poli (2-etil-2-oxazolona) (PEtOx) y posteriormente estudiar su degradación y la reticulación formada durante el tratamiento (Egghe y col., 2021). Estos polímeros, así como el PET, no tienen actividad química superficial por sí solos, por lo que el plasma representa una alternativa con múltiples beneficios ya que puede cambiar esta naturaleza superficialmente, de acuerdo a la aplicación que se les quiera dar. Para el caso del polietiléntereftalato, no se han encontrado reportes del uso de la tecnología de plasma para modificar su superficie y menos aún para la eliminación de fenol en el tratamiento de aguas residuales.

Como se ha examinado anteriormente, el plasma ha sido utilizado como herramienta para modificar superficies poliméricas para distintas aplicaciones, sin embargo, también ha sido empleado para modificar otro tipo de materiales

diferentes a los plásticos, con el mismo objetivo de degradar compuestos fenólicos en aguas residuales. Algunos de estos materiales se enlistan en la Tabla 4, en la cual se puede observar que han sido pocos los materiales no poliméricos modificados con esta técnica en los últimos años, para la degradación de fenoles, esto podría deberse a que los polímeros poseen propiedades que les permiten ser modificados en su superficie más fácilmente en comparación con materiales metálicos o cerámicos, ya que estos tienen propiedades contrarias a las que presentan los polímeros. En el caso del PET, se caracteriza por su alta resistencia a la tracción, elevada resistencia a los productos químicos, rentabilidad y transparencia, propiedades que lo hacen un sustrato ideal para convertir biomacromoléculas (Ming y col., 2017). Otras cualidades del PET que lo convierten en uno de los polímeros que más llaman la atención sobre otros materiales, son su alta resistencia en relación a su peso, su resistencia a la corrosión y su bajo costo (Narimisa y col., 2021), por lo que a pesar de que sea utilizado dentro del agua, para la eliminación de fenoles, tendrá una larga vida de uso.

Tabla 4. Materiales modificados superficialmente con plasma para degradar compuestos fenoles en aguas residuales.

Material	Contribución
Titanio y Platino. (Zhang y col., 2018).	Electrólisis de plasma por microarco catódico (CMPE).
TiO ₂ y óxido de grafeno sobre PVDF. (Mai y col., 2020).	Activación de superficie polimérica con plasma de argón, usando polvos mixtos y ácido acrílico, para eliminar m-nitrofenol.
Acero al carbono Q235. (Jiankang y col., 2017).	Recubrimiento de acero con ácido sólido mediante oxidación electrolítica con plasma.

CONCLUSIÓN

En esta revisión se presenta la problemática debido a la contaminación del medio ambiente con altas cantidades de desechos de botellas de plástico de PET, así como los fundamentos teóricos de una posible solución para disminuir su impacto ecológico. Se abordaron las definiciones de los conceptos necesarios para entender cómo es posible contrarrestar este problema a través del uso de una tecnología limpia, como es el plasma y una metodología biológica basada en la inmovilización de enzimas, con la cual es posible también contrarrestar otro problema ambiental de gran relevancia que es la contaminación de aguas residuales con fenoles, ya que son considerados altamente tóxicos para el ser humano.

El plasma como una tecnología limpia y verde, ejemplifica de manera precisa una respuesta viable que vale la pena analizar para disminuir el porcentaje de residuos de botellas plásticas, a través de la modificación estructural del material, lo que da como resultado una superficie con propiedades diferentes, proporcionando un material que puede ser utilizado como soporte para inmovilizar enzimas lacasa, las cuales poseen la capacidad de degradar compuestos orgánicos como son los grupos fenol.

El desarrollo de esta propuesta puede ser posible gracias a los continuos esfuerzos científicos de diversos investigadores que dan a conocer día a día nuevos avances que proporcionan mayor información, con la cual se pueden crear soluciones innovadoras y sustentables para la resolución de problemas ambientales, como los mencionados en este trabajo.

Es importante mencionar, que no solo se trata de desarrollar métodos, técnicas, o materiales para nuevas aplicaciones industriales y/o científicas, también es importante buscar otros posibles usos a estos avances tecnológicos, que puedan

contribuir a la resolución de problemas ya existentes, como son la contaminación de los recursos naturales. Es vital, difundir este tipo de publicaciones para aquellos interesados en el tema, con el fin de dar a conocer nuevas líneas de investigación y conocimientos que no se tenían con respecto a los temas abordados en esta revisión de conceptos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca con No. CVU 1000741 para la realización de este posgrado. Se agradece también al COECYT y al Gobierno del Estado de Coahuila por medio del fondo FONCYT por el financiamiento para la realización de esta investigación. Se agradece a la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Coahuila, por ofrecer el posgrado en Ciencia y Tecnología Química, y a su vez, proporcionar las instalaciones y equipos necesarios para el desarrollo de ese trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alarcón, D. (2017). *Diseño de nanopartículas de quitosano con actividad peroxidasa para la degradación de contaminantes*. Tesis Maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México.

Bilal, M.; Jing, Z. & M, H. (2019). Immobilization of fungal laccase on glutaraldehyde cross-linked chitosan beads and its bio-catalytic potential to degrade bisphenol A. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 19.

Bustamante, E. (2012). *Comparación de la cinética de decoloración de índigo carmín utilizando diferentes sistemas de inmovilización de enzimas extracelulares de Trametes versicolor*. Tesis Maestría. Instituto Politécnico Nacional, Tlaxcala, México.

Castillo, E. (2004). *Aplicación de recubrimientos vía plasma en superficies metálicas*. Tesis Especialización. Centro de Investigación en Química Aplicada, Coahuila, México.

Egghe, T., Van, J., Ghobeira, R., Morent, R., Hoogenboom, R. & De Geyter, N. (2021). Evaluación de los procesos de reticulación y degradación que ocurren en las superficies de los polímeros tras la activación del plasma mediante cromatografía de exclusión por tamaño. *Polymer Degradation and Stability*. 187.

Gayatri, L. & Ahmaruzzaman, M. (2014). Phenolic Wastewater Treatment: Development and Applications of Adsorbent Materiales. *Industrial Wastewater Treatment, Recycling and Reuse*. 323-368.

Ghoul, M., Chebil, L. (2012). *Enzymatic polymerization of phenolic compounds by oxidoreductases*. Francia: Ed. Springer.

Hernández, E. (2015). *Remoción de compuestos fenólicos de aguas residuales de la refinación del petróleo mediante electrocoagulación, fenton y foto-fenton*. Tesis Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México.

Jiankan, W., Zhaohua, J., Yajing, W., Qixing, X. & Zhongping, Y. (2017). Design of a novel immobilized solid coating and its application in Fenton-like oxidation of phenol. *Applied Surface Science*. (409), 358-366.

Liu, J.; Shen, X. & Cui, C. (2020). Immobilization of laccase by 3D bioprinting and its application in the biodegradation of phenolic compounds. *International Journal of Biological Macromolecules*, 164, 518-525.

Mai, T., Chun, F., Ting, W., Chien, H. & Ruey, J. (2020). Surface coating of titania and graphene oxide onto plasma-activated polymer membranes as efficient photocatalysts for organic removal from water. *Journal of Water Process Engineering*. 37.

Martínez, Y. (2005). *Modificación superficial de materiales por plasma para aplicaciones médicas*. Tesis Especialización. Centro de Investigación en Química Aplicada, Coahuila, México.

Meneau, R.I., Borrego, K., Liva, M. & Fariñas, T. (2020). Inmovilización una mirada a los métodos, soportes y retos. *Revista Centro Nacional Investigaciones Científicas CENIC*. 52, (1), 059-078.

Ming, G., Liqun, S., Ying, G., Jianjun, S. & Jing, Z. (2017). Modification of polyethylene terephthalate (PET) films Surface with gradient roughness an homogenous surface chemistry by dielectric barrieri discharge plasma. *Chemical Physics letters*, 689, 179-184.

Mohan, J.; Prakash, R.; Behari, J.R. (2004). Electrochemical detection and catalytic oxidation of phenolic compounds over nickel complex modified graphite electrode. *Applied Ecology and Environmental Research*. 2, (2), 25 - 33.

Mokhtar, A.; Nishioka, T. & Okobira, T. (2019). Novel biodegradation system for bisphenol A using laccase-immobilized hollow fiber membranes. *International Journal of Biological Macromolecules*, 130, 737-744.

Narimisa, M., Onyshchenko, Y., Morent, R. & De Geyter, N. (2021). Improvement of PET surface modification using an atmospheric pressure plasma jet with different shielding gases. *Polymer*, 215.

Nicolás, P. (2017). *Síntesis y caracterización de partículas magnéticas para su aplicación en biotecnología*. Tesis Doctoral. Universidad Nacional del Sur, Argentina, México.

Nisticó, R. (2020, 20 junio). Polyethylene terephthalate (PET) in the packing industry. *Polymer testing*, (90), 106707.

Oliva, A. (2017). *Integración de enzimas lacasas en el proceso de producción de etanol de lignocelulosa: efecto sobre la hidrólisis enzimática y la fermentación*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid, España. México.

Pardo, S., Rojas, D., Roldan, F., Brandap, P. & Almansa, E. (2017). Biodegradación de fenol en aguas tratadas de la industria petrolera para re-uso en cultivos agrícolas. *Revista de Biología Tropical*. (65), 685-699.

Peñarrieta, J., Tejeda, L., Mollinedo, P., Vila, J. & Bravo, J. (2014, 31 diciembre). Phenolic compounds in food. *Revista Boliviana de Química*, 31, (2), 68-81.

Qiu, X.; Wang, Y. & Hu, Y. (2019). Laccase immobilized on magnetic nanoparticles modified by amino-functionalized ionic liquid via dialdehyde starch for phenolic compounds biodegradation. *Chemical Engineering Journal*, 391.

Rahmani, H.; Lakzian, A. & Halajnia, A. (2019). Efficient removal of 2,4-dinitrophenol from synthetic wastewater and contaminated soil samples using free and immobilized laccases. *Journal Envio Managment*, 256.

Ramírez, N., Vargas, M., Ariza, J. & Martínez, C. (2003, 05 agosto) Caracterización de la lacasa obtenida por dos métodos de producción con *Pleurotus ostrearius*. *Revista colombiana de biotecnología*, 5, (2), 64-72.

Río, R. C. (2016). El polietilén tereftalato (PET) como envase de aguas minerales. *Boletín de la Sociedad Española de Hidrología Médica*. (31), 179-190.

Romero, L., Mejía, C.M., Sánchez, A., Balagurusamy, N. & Luévanos, M.P. (2014). Aplicaciones de las Enzimas Inmovilizadas. *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*, 6, (11), 1-9.

Salazar, J., Lizardi., Ramírez, J., García, G., Ezquerro, J., Valenzuela, E., Carvallo, M., Lugo, M. & Pacheco, Ag. (2014). Utilización de materiales a base de quitina y quitosano en la inmovilización de proteasas: efectos en su estabilización y aplicaciones. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 13, (1), 129-150.

Secretaría de economía. (2001). *Análisis de agua – Determinación de fenoles totales en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas – Método de prueba*. (Norma NMX-AA-050-SCFI-20021). [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166783/NMX-AA-050-SCFI-2001.pdf>

Fecha de consulta: 09 de agosto de 2021.

Sitio Oficial ECOCE A.C. (2020). *Quiénes somos*. [En línea]. Disponible en:
<https://www.ecoce.mx/>

Fecha de consulta: 27 de septiembre de 2021.

Sitio Oficial Honorable Cámara de Diputados. (2017). *Boletín No. 3469 En México, 90 millones de botellas de plástico de refresco y agua son lanzados a la vía pública, ríos y mares*. Cámara de Diputados LXV Legislatura. [En línea]. Disponible en:

<http://www5.diputados.gob.mx/index.php/esl/Comunicacion/Boletines/2017/Abril/13/3469-En-Mexico-90-millones-de-botellas-de-plastico-de-refrescos-y-agua-son-lanzados-a-la-via-publica-rios-y-mares>

Fecha de consulta: 29 de septiembre de 2021.

Sundriyal, P., Sahu, M., Prakash, O. & Bhattacharya. (2021). Modificación de la superficie a largo plazo del polímero PEEK mediante plasma y tratamiento con silano PEG. *Surfaces and Interfaces*. 25.

Vesel, A., Zaplotnik, R., Mozetic, M. & Prime, G. (2021). Modificación de la superficie del polímero PS por tratamiento con átomos de oxígeno de plasma remoto: cinética inicial de formación de grupos funcionales. *Applied Surface Science*. 561.

Villalobos, A. (2018). *Estudio del agrietamiento por tensión ambiental de envases de PET*. Tesis Especialización. Centro de Investigación en Química Aplicada, Coahuila, México.

Wang, D.; Lou, J. & Fan, X. (2020). Laccase immobilization on core-shell magnetic metal-organic framework microspheres for alkylphenol ethoxylate compound removal. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9.

Wu, E.; Li, Y. & Hu, Q. (2019). Laccase immobilization on amino-functionalized magnetic metal organic framework for phenolic compounds removal. *Chem*, 233, 327-335.

Yao, R. S., Sun, M., Wang, C. L., & Deng, S. S. (2006). Degradación de compuestos fenólicos con peróxido de hidrógeno catalizado por la enzima *Serratia marcescens*. *Water Research Journal*, 40, (16), 3091–3098.

Yifan, Z., Xiaoyue, J., Ying, W., Yange, Y., Guijun, L., Zhanbin, Z. & Wenbin X. (2018). Effects of Experimental Parameters on phenol Degradation by Cathodic Microarc Plasma Electrolysis. *Separation and Purification Technology*, 201, 179-185.

Zhang, Ch.; You, S. & He, Z. (2020). Construction of luffa sponge-based magnetic carbon nanocarriers for laccase immobilization and its application in the removal of bisphenol A. *Bioresource Technology Journal*, 305.

Zhang, K.; Yang, W. & Yin, X. (2020). Laccase immobilized on chitosan-coated Fe₃O₄ nanoparticles as reusable biocatalyst for degradation of chlorofenol. *Journal of Molecular Structure*, 1220.

Sistemas para la Liberación Sostenida de Doxorrubicina basados en sílice mesoporosa y quitosano: una revisión

Systems for the Sustained Release of Doxorubicin based on mesoporous silica and chitosan: a review

Raúl Moreno Ruíz¹, Antonia Martínez Luévanos², Sofía Estrada Flores²,
María Cristina Ibarra Alonso^{3*}.

¹Maestría en Ciencia y Tecnología Química. Facultad de Ciencias Químicas.
Universidad Autónoma de Coahuila. Boulevard Venustiano Carranza. 25280. Saltillo,
Coahuila, México.

²Departamento de Materiales Cerámicos Avanzados y Energía.
Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Coahuila.
Boulevard Venustiano Carranza. 25280. Saltillo, Coahuila, México.

³Cátedras Conacyt-Universidad Autónoma de Coahuila.
Boulevard Venustiano Carranza. 25280.
Saltillo, Coahuila, México.

Correo: raulmorenoruiz@uadec.edu.mx;

*Autor por correspondencia: ibarra.cristina@uadec.edu.mx

Resumen

En última década se han desarrollado numerosos sistemas de liberación sostenida de diversos fármacos, sin embargo, es necesario continuar investigando sobre este tipo de sistemas para su empleo en la liberación controlada de fármacos anticancerígenos, puesto que aún no se cuenta con un sistema de liberación adecuado para su uso *in vivo*. Los biomateriales a base de quitosano y sílice han presentado resultados eficientes de liberación sostenidas *in vitro*, por lo que representan una excelente alternativa para su futuro empleo *in vivo*.

Palabras clave: biomateriales, liberación sostenida, quitosano, sílice, doxorubicina.

Abstract

In recent decades, numerous sustained-release anticancer drug systems have been developed. However, the development and research of these systems must be further expanded to achieve efficient platforms or systems in the controlled release of anticancer drugs, since there is still no adequate delivery system to scale their use *in vivo*. Biomaterials based on chitosan and silica have demonstrated efficient sustained release results *in vitro*, thus representing an excellent alternative for future use *in vivo*.

Keywords: biomaterials, sustained release, chitosan, silica, doxorubicin.

1. Introducción

La problemática del cáncer va incrementando a nivel mundial y la quimioterapia se utiliza como el principal tratamiento para esta enfermedad. En general el tratamiento de quimioterapia activa los sistemas inmunológicos inherentes para eliminación de

células cancerosas, sin embargo, los fármacos utilizados para la quimioterapia también pueden dañar las células sanas, causando efectos secundarios no deseados. Los biomateriales compuestos como sistemas de entrega fármacos anticancerígenos son una alternativa a los tratamientos convencionales contra el cáncer, principalmente por su biocompatibilidad y prometedora entrega en el sitio adecuado y el control de la dosificación por periodos largos (Esquivel y col., 2019; Shi y col., 2011).

Esta revisión presenta un análisis de la síntesis de biomateriales a base sílice y quitosano y de su uso como sistemas de entrega de doxorubicina (DOX) para el eficiente tratamiento del cáncer. En particular, se hace un análisis sobre algunas de las características o condiciones deseables para su uso como sistemas de administración de fármacos, como el tamaño de poro, área superficial específica, funcionalización de la superficie, estabilidad frente al pH, así como en el tamaño promedio de partícula del fármaco, para finalmente proporcionar una eficiente guía para preparación sistemas a base de sílice y quitosano para la entrega de DOX.

2. Biomateriales

Los biomateriales son ampliamente utilizados en el área médica y se clasifican principalmente en tres categorías, que incluyen polímeros, metales y cerámicos (Pezzotti y col., 2021). Actualmente su uso en la biomedicina es muy amplio, sobresale su uso en ingeniería de tejido óseo, en odontología como implantes dentales, biocementos y en la medicina como vehículos o sistemas para la liberación de fármacos de manera sostenida. En la Figura 1 se presentan diversos tipos de aplicación de los biomateriales (Calambás y col., 2014).

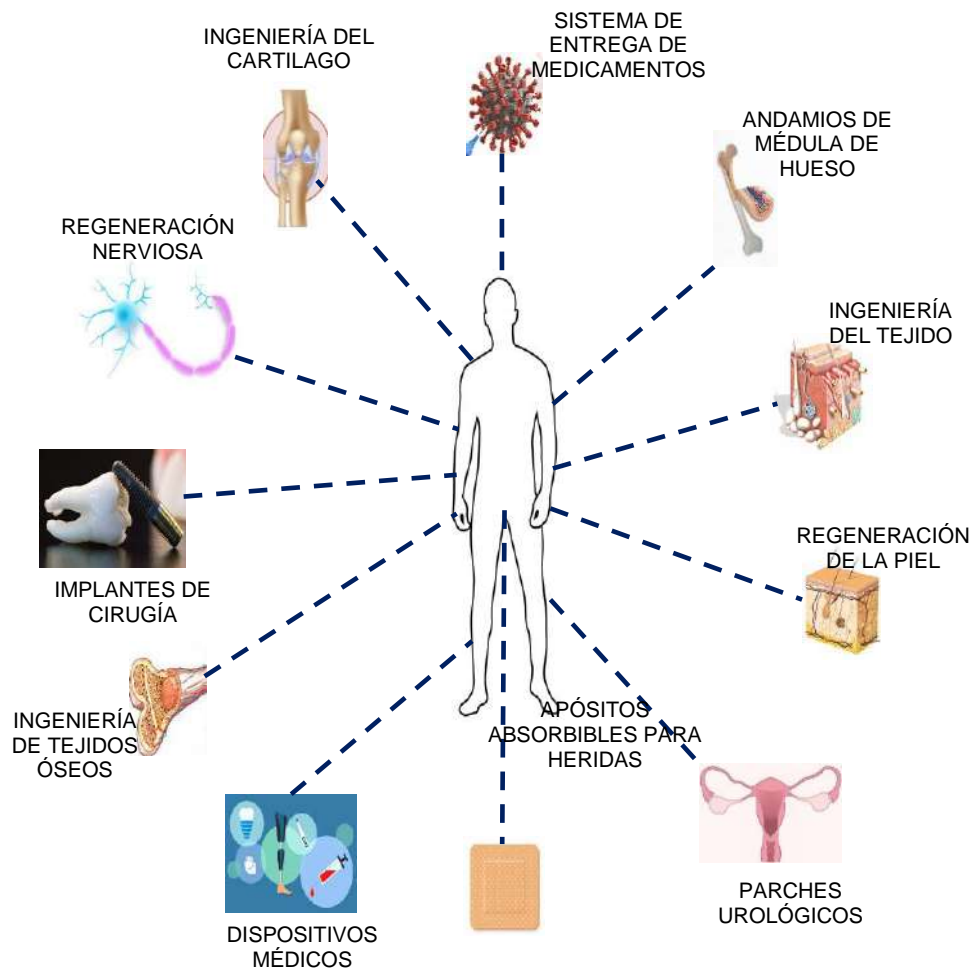


Figura 1. Aplicaciones de los biomateriales (Adaptada de Calambás y col., 2014).

2.1 Tipos de Biomateriales

Biocerámicos

Los biocerámicos son ampliamente utilizados debido a su excelente biocompatibilidad (Pezzotti y col., 2021). La sílice (SiO_2), zirconia (ZrO_2), alúmina (Al_2O_3) y titania (TiO_2), son algunos de los biocerámicos empleados para aplicaciones biomédicas (Gul y col., 2020; Prenzel y col., 2013).

La sílice, en particular las nanopartículas de sílice mesoporosa (NP-mSiO_2) ha sido ampliamente investigada para usarla como sistemas de liberación de diversos tipos de fármacos, debido principalmente a su estructura mesoporosa. El proceso de mineralización es la ruta más comúnmente estudiada hacia la síntesis de cerámicos como la sílice, lo cual se logra a través del uso de tensioactivos como el bromuro de hexadeciltrimetilamonio, CTAB, o el Pluronic P123) y utilizando como fuente de sílice al tetraetil ortosilicato (TEOS), en condiciones ácidas y básicas (Panek y col., 2021). Las sílices comercialmente llamadas SBA-15 y MCM-41, han sido propuestas como sistemas de liberación controlada de fármacos en aplicaciones biomédicas. La sílice SBA-15 tiene un tamaño de partícula de 150 μm , con tamaño de poro de 2 a 10 nm, área superficial de 450 a 550 m^2/g y sus poros tienen una morfología hexagonal; por otro lado, la sílice MCM-41 tiene un valor de área superficial menor de 1000 m^2/g , tamaño de poro de 2.1 a 2.7 nm. La principal diferencia entre estas dos sílices es que la SBA-15 contiene mesoporos anchos interconectados y la sílice MCM-41 tiene mesoporos estrechos (Janus y col., 2020; Panek y col., 2021).

Con respecto a la absorción de fármacos en MCM-41 y SBA-15, la absorción se encuentra limitada por el diámetro del poro, es decir, el tamaño de poro está directamente relacionado con el tamaño del fármaco huésped, por lo que su eficiencia de carga puede ser buena si el tamaño de la molécula del fármaco es menor a los 10 nm (Sakatani y col., 2008). La doxorubicina tiene un tamaño aproximado de 1.5 a 2.5 nm de diámetro, por lo que se absorbe fácilmente en los poros de la sílice (Bilalis y col., 2016; Lin y col., 2021; Landon y col., 2011).

En general, los biocerámicos presentan estructuras muy porosas y son muy biocompatibles, pero tienen como desventaja su baja resistencia mecánica (George y col., 2020), por lo que actualmente se pueden encontrar sistemas de liberación a base de biocerámicos y biopolímeros, es decir, biocompositos tipo cerámico/polímero.

Biomateriales poliméricos

Los biopolímeros son biodegradables y biocompatibles; según la literatura, son menos tóxicos y menos inmunogénicos, comparados con otros materiales (Ankit y col., 2021; George y col., 2020), por lo que son candidatos prometedores para el desarrollo de sistemas de administración de fármacos. Los polímeros más utilizados como materiales biomédicos son el polietileno de alto peso molecular, poliamidas, siliconas y los polímeros biodegradables por ejemplo como la celulosa, ácido poliglicólico el quitosano (Tahir y col., 2022), son ampliamente usados en aplicaciones médicas, siendo el quitosano el que nos interesa en el presente trabajo.

Quitosano

En la actualidad el quitosano es uno de los biopolímeros más empleados para la administración de fármacos (Tahir y col., 2022). El Quitosano es un polímero catiónico derivado de la quitina, el cual es un polisacárido natural y abundante, que se encuentra en los organismos marinos como camarones, langostas, cangrejos calamares y pulpos (Teng y col., 2001).

La cadena macromolecular de quitosano obtenida por desacetilación de quitina contiene grupos amino por lo que tiene gran reactividad. Siendo el 64% de desacetilación, para considerar como un biopolímero al quitosano. La presencia de grupos amino brinda la posibilidad de muchas reacciones químicas, como alquilación y quelación de metales (Yilmaz y col., 2019). La secuencia del grupo

amino y del grupo acetil-amino de las moléculas de quitosano, son un parámetro importante que afecta las propiedades físicas del quitosano. El grupo amino hace que el estado de carga del quitosano sea susceptible a la influencia del valor del pH, lo cual puede ser utilizado como un estímulo para el control de la liberación. Cuando el valor de pH del sistema de disolución de quitosano es menor de 6, el grupo amino se carga positivamente por protonación, lo que hace que el quitosano se convierta en un polisacárido catiónico soluble en agua (Pillai y col., 2009). Cuando el valor del pH es superior a 6, la desprotonación de los grupos hará que las macromoléculas de quitosano pierden carga y sean insolubles, por lo que, el quitosano a menudo se disuelve en ácidos diluidos.

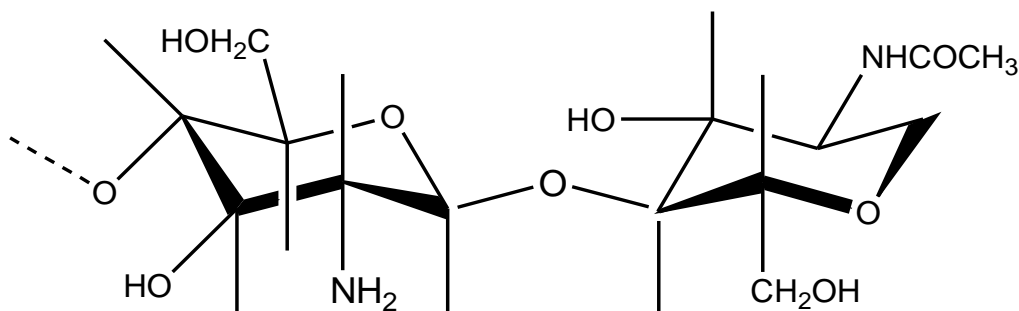


Figura 2. Estructura química del quitosano (Tsai y col., 2011).

3. Carga de fármacos en sistemas a base de sílice mesoporosa

Actualmente se emplean diferentes procedimientos de carga de fármacos, los métodos más comunes emplean solventes orgánicos, para llevar a cabo la carga como lo son la difusión o impregnación del incipiente, evaporación del solvente, tecnología de CO₂ líquido y supercrítico, encapsulamiento del fármaco (Yilmaz y col., 2019).

Trzeciak y col., mencionan que para obtener una eficiente carga en sílice mesoporosa existen tres desventajas principales a vencer, la primera es la pérdida

significativa del fármaco en la etapa final, al emplear la filtración o al centrifugar para recuperar los sistemas cargados, la segunda desventaja es la dificultad en monitorear in situ el porcentaje de carga del fármaco, y la tercera es la pobre disolución de la mayoría de los fármacos, o que solo sean solubles en solventes tóxicos (Trzeciak y col 2020). Trzeciak y col., propusieron un método fácil y eficiente para la carga de fármacos en los poros de sílice mesoporosas, mediante difusión, utilizaron MCM-41 y etanol como solvente. El procedimiento consistió en realizar una mezcla física del fármaco y de la sílice mesoporosa. Esta mezcla se colocó en un recipiente cerrado conteniendo etanol, durante 3 horas y a temperatura ambiente (Figura 3). Finalmente, el etanol se elimina de la sílice cargada, calentando en un horno a 50 °C durante 6 h. La funcionalidad de este método consiste en que el fármaco al estar muy cerca del poro de la sílice, requiere un volumen mínimo de solvente para introducirse en los poros. Técnicamente, este proceso se lleva en dos etapas; en la primera etapa, aunque no hay contacto directo entre etanol y la mezcla física (sílice y fármaco), si existe contacto entre ellos mediante la difusión de los vapores del solvente y la mezcla, en la segunda etapa, los vapores penetran los poros de la sílice, condensándose y difundiendo dentro de los poros. Este método ha sido probado para la carga de ibuprofeno, pero tiene gran potencial para cargar diferentes fármacos (Trzeciak y col 2020).

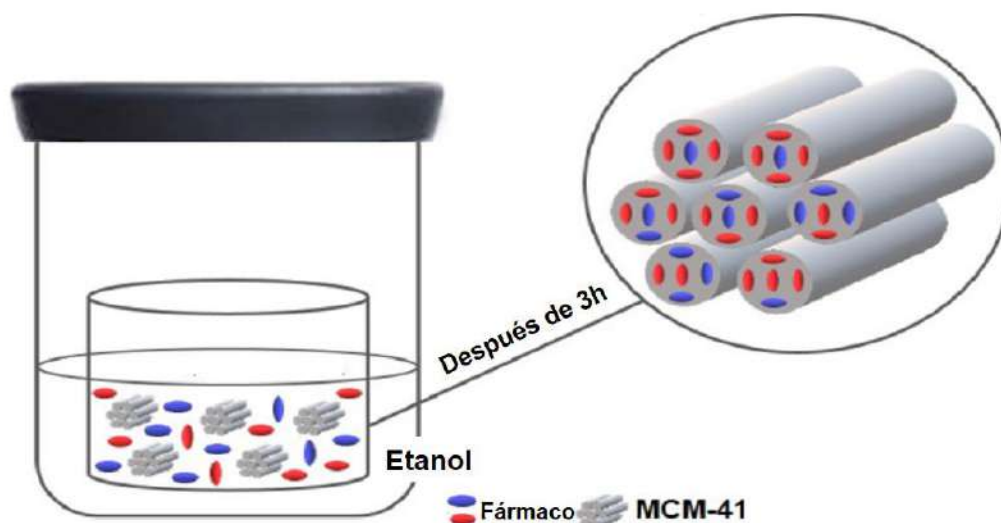


Figura 3. Ilustración esquemática de la carga de fármacos en los poros de sílice (MCM-41) (Adaptada de Trzeciak y col., 2020).

4. Compositos a base de quitosano y sílice, como eficientes sistemas en la entrega de doxorrubicina

Los compositos son materiales constituidos por lo menos de dos tipos de materiales de distinta composición química y presentan propiedades distintas y/o mejoradas con respecto a las de los componentes individuales, por lo que los compositos de SiO₂ y quitosano resultaran ser altamente biocompatibles, con mayor capacidad de carga y de liberación de fármaco dirigida. Debido a estas ventajas, en la literatura se reporta ampliamente la síntesis de compositos de SiO₂/quitosano para diversas aplicaciones como biomateriales. Sin embargo, el principal desafío en la administración controlada de fármacos es la unión del sistema y la parte específica del cuerpo donde se desea liberar el fármaco; por esta razón, se han estado realizando grandes esfuerzos de forma continua para satisfacer esta necesidad. Estímulos como la temperatura, cambios de pH y cinética de liberación, son

estrategias que pueden permitir una liberación inteligente del fármaco (Peng y col., 2019).

En cuanto a los fármacos que se han empleado en tratamientos de cáncer, está la DOX; este es un fármaco hidrófobo, eficiente en el tratamiento de diversos tipos de cáncer, principalmente el de mama, debido a su eficiente actividad antitumoral al inhibir al ácido nucleico del material genético en células cancerosa, sin embargo, su aplicación es limitada debido a su alta toxicidad, junto con otras deficiencias asociadas con la quimioterapia convencional. Por lo tanto, es importante desarrollar un sistema de administración de DOX, que permita disminuir sus efectos dañinos. Los hidrogeles a base de quitosano, de acuerdo con Chen y col., contienen la concentración óptima de DOX y la viscosidad específica, para la eficiente liberación. Los hidrogeles cargados con DOX y recubiertos con Ferumoxytol (FMT) pueden absorber aún más una gran cantidad de agua en su estructura, lo cual conduce a un mayor índice de viscosidad, estado óptimo para la administración local *in vivo*, con una aplicación de baja movilidad, por lo que un mayor índice de viscosidad pudiera ser un eficiente estímulo, para la liberación óptima de DOX en los hidrogeles de quitosano (Chen y col., 2018).

Con el objetivo del transporte eficiente de DOX, los autores fabricaron un compuesto con estructura de tipo core-shell a base de sílice mesoporosa ($mSiO_2$) y quitosano (CS), empleando 3-glicidoxipropil-trimetoxisilano (GPTMS) como agente de reticulación (Lin y col., 2021; Lohiya y col., 2021). Los autores indican que estímulos como el pH y la temperatura, no solo afectan en la liberación de fármaco, también se ve afectada la estabilidad coloidal y morfología de las partículas de sílice al variar estos estímulos (Figura 4). Al incrementar la temperatura de reacción de 50 a 60 °C, la dispersión de partículas de sílice fue más evidente, debido a que, al incrementar la temperatura, se obtiene una mayor velocidad de reacción de hidrólisis, por consiguiente, es más rápida la velocidad de crecimiento de núcleos, resultando en

una mejor dispersión de nanopartículas, sin embargo, en forma de varilla (Lin y col., 2021).

El valor de pH también tiene efecto en la síntesis de sílice; a pH 10 a 10.5, los autores Lin y col., 2021 describen una morfología irregular. En contraste a un valor de pH más alcalino (pH =11.5), la esfericidad de las nanopartículas se vuelve más redonda (Lin y col., 2021). Respecto a la sensibilidad al pH y su efecto en la liberación de DOX, a un valor de pH igual a 3, se mejoró el efecto terapéutico, obteniéndose una óptima liberación. Estos vehículos o compositos a base de sílice mesoporosa y quitosano reticulado con GPTMS son una idea novedosa y una excelente alternativa para la liberación de fármacos comúnmente utilizados en los tratamientos contra el cáncer (Lin y col., 2021).

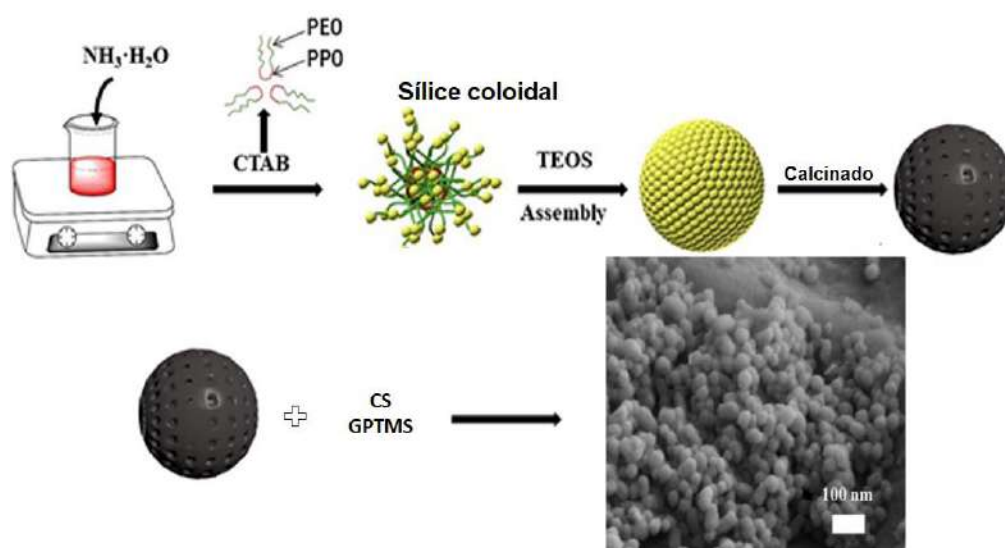


Figura 4. Diagrama esquemático de la síntesis de SiO₂/CS (Adaptada de Lin y col., 2021).

Los aerogeles de quitosano también han sido investigados como sistemas para liberación de fármacos. Zhao y col., en 2016, fabricaron aerogeles de quitosano ultraligeros y con alta porosidad, posicionándose como materiales novedosos para la carga y liberación de fármacos (Zhao y col., 2016). Adicionalmente, sus moléculas pueden variar en los valores de masa molecular y grados de desacetilación promedio o grupos aminos libres, lo cual determina la calidad y el uso de estos biomateriales. Por lo general, el método de síntesis de los aerogeles consiste en la eliminación de todos los agentes de hinchamiento en el estado gel, sin una reducción sustancial del volumen, o degradación (Doshi y col., 2018).

Zhao y col., prepararon aerogeles a base de quitosano y sílice mesoporosa a través ruta sustentable mediante la congelación de ácido silícico con quitosano en medios acuosos. Las propiedades físicas, específicamente la gelificación de los aerogeles resulto ser dependiente del cambio de pH. Se obtuvo una estructura aleatoria "racimo-racimo" entrelazada a nivel molecular, con la adición de sílice mesoporosa en los aerogeles quitosano. Este biocompuestos inorgánicos/ orgánicos, posee gran potencial como sistemas de liberación. La Figura 5 ilustra la síntesis y el aspecto físico del aerogel a base de sílice mesoporosa y quitosano, con estructura aleatoria "racimo-racimo" (Zhao y col., 2016).

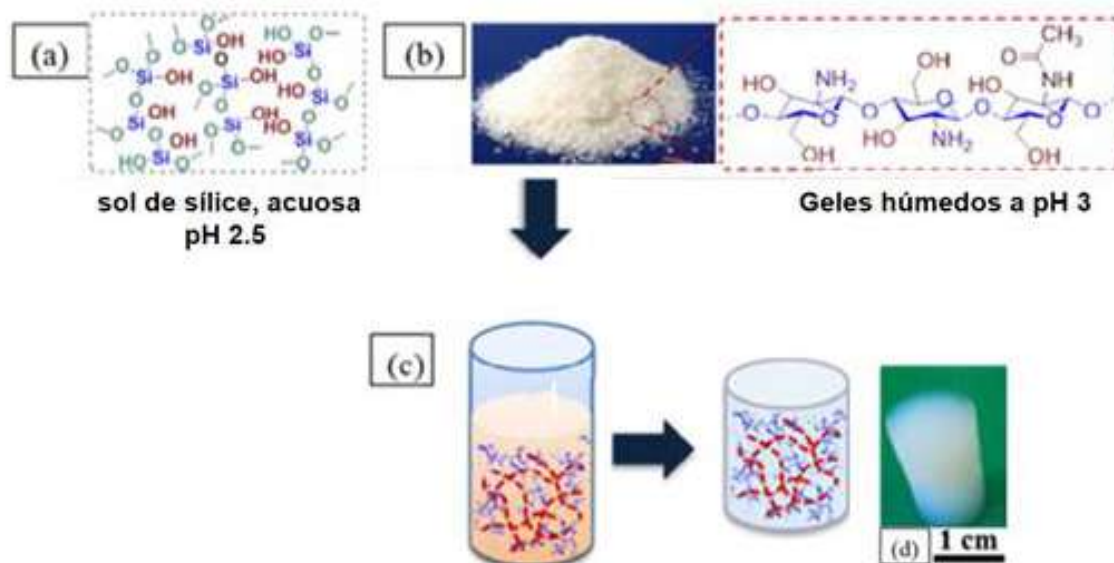


Figura 5. Esquema que ilustra la síntesis del aerogeles compuestos de quitosano y SiO_2 , (a) estructura de racimos coloidales de SiO_2 (b) quitosano (c) ilustración de la sílice con quitosano en medios acuosos (d) Fotografía digital del aerogeles.

SCD significa secado supercrítico (Adaptada de Zhao y col., 2016).

Los sistemas de liberación de sílice y quitosano permiten optimizar la liberación y reducir los efectos secundarios, mediante una concentración terapéutica del fármaco que sea estable en el organismo. Se trata de alcanzar una cinética de liberación de orden cero y sin cambios en la concentración del fármaco en el organismo, comparándolo con los cambios intermitentes de concentración en las dosificaciones convencionales (Pezzotti y col., 2021). Las investigaciones más recientes se enfocan en la búsqueda de un sistema que libere DOX de manera dirigida hacia un lugar específico del cuerpo. En este sentido, se trata de asegurar que el fármaco se libere en el lugar requerido. Los sistemas de liberación basados en sílice/quitosano representan una alternativa prometedora para este fin.

5. Conclusiones

En este artículo se analizaron las diferentes estrategias para la obtención de sistemas de SiO₂, quitosano y sus compositos para la liberación de doxorubicina. El conjunto de propiedades de la sílice (no tóxica y porosa) y del quitosano (biodegradable y sensible al pH), son cruciales para la formación de sistemas con aplicaciones farmacéuticas. Aunque algunos estudios sobre el desarrollo de sistemas de liberación basados en biomateriales de quitosano/sílice indican que estos son excelentes plataformas para la liberación de DOX *in vitro*, es necesario continuar investigando sobre este tipo de sistemas, para poder comprender y mejorar su comportamiento en la cinética de liberación de DOX, con el objetivo de avanzar hacia su posible aplicación *in vivo*.

Agradecimientos

Raúl A. Moreno Ruíz agradece al CONACYT por la beca número 787934, otorgada para sus estudios de Maestría. Antonia Martínez-Luévanos agradece a la Universidad Autónoma de Coahuila el apoyo al proyecto “Desarrollo de biomateriales para su aplicación en ingeniería de tejidos óseos, implantología y liberación controlada de fármacos”. María Cristina Ibarra Alonso agradece al CONACYT por el financiamiento al proyecto con número 287245 (CB-2016-01).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ankit, J., Madhavi, T., Shiv, K. P., & Ashok, A. R. (2021). Biopolymer Matrix Composite for Drug Delivery Applications in Cancer. D. Brabazon (Eds.), *Encyclopedia of Materials: Composites* (pp. 804-817). United States: Elsevier, Netherlands.

Bilalis, P., Tziveleka, L., Spyridon, V., & Iatrou H. (2016). pH-Sensitive nanogates based on poly(L-histidine) for controlled drug release from mesoporous silica nanoparticles. *Polymer Chemistry*, 7:1475–1485

Calambás, H. (2014). “Materiales compuestos de alúmina-zirconia para aplicaciones biomédicas.” Tesis de Doctoral. Universidad Nacional de la Plata, Argentina Pp. 90.

Chen, B., Sun, J. S., Fan F., Zhang, X., Qin, Z., Wang, P., Li, Y., Xiquan, Z., Fei, L., Yanlong, L., Min, J., & Ning, G. (2018). Ferumoxitol of ultrahigh magnetization produced by hydrocooling and magnetically internal heating co-precipitation. *Nanoscale*. 10:7369–7376.

Doshi, B., Sillanpää, M., & Kalliola, S. (2018). A review of bio-based materials for oil spill treatment. *Water Research*. 135:262-277.

Esquivel, C. A., Ibarra, A. C., Oliva, U. J., & Martínez, L. A. (2018). Porous aerogel and core/shell nanoparticles for controlled drug delivery: A review. *Materials Science and Engineering: C*. 96:915-940.

George, A. M., Reddy, S. P., Thakur, G., & Concy, R. (2020) 29-Biopolymer-based scaffolds: Development and biomedical applications. K. Pal, I. Banerjee, P. Sarkar, D. Kim, W. Deng, K. Dubey, K. Majumder (Eds.), *Biopolymer-Based Formulations* (pp. 717-749). United States: Elsevier, Netherlands.

Gul, H., Khan, M., & Khan, S. A. (2020) 3-Bioceramics: types and clinical applications. S. Khan, A. A. Chaudhry (Eds.), *In Woodhead Publishing Series in Biomaterials, Handbook of Ionic Substituted Hydroxyapatites* (pp. 53-58). United States: Elsevier, Netherlands.

Janus, P., Janus, R., Dudek, B., Drozdek, M., Silvestre, A., Rodríguez, R. F., & Kuśtrowski, P. (2020). On mechanism of formation of SBA-15/furfuryl alcohol-derived mesoporous carbon replicas and its relationship with catalytic activity in oxidative dehydrogenation of ethylbenzene. *Microporous and Mesoporous Materials*. 299:110118 (Pp.13).

Landon, C., Park, J., Needham, D., & Dewhirs M. (2011). Nanoscale Drug Delivery and Hyperthermia: The Materials Design and Preclinical and Clinical Testing of Low Temperature-Sensitive Liposomes Used in Combination with Mild Hyperthermia in the Treatment of Local Cancer. *The Open Nanomedicine Journal*. 3:38-64.

Lin, J., Peng, C., Ravi, S., Nur, A. S., Zheng, J., & Balkus K. (2020). Biphenyl Wrinkled Mesoporous Silica Nanoparticles for pH-Responsive Doxorubicin Drug Delivery. *Materials*. 13: 1998-2008.

Lin, Z., Gong, C., Tang, L., Bilang, C., Sheng, F., Zhong, W., & Yong-guang, B. (2021). Study on preparation and in vitro anti-tumor activity of chitosan-modified mesoporous silica hybrids by GPTMS cross-linking agent. *Reactive and Functional Polymers*. 169:105072 (Pp. 13).

Lohiya, G., & Katti, D. (2022). Carboxylated chitosan-mediated improved efficacy of mesoporous silica nanoparticle-based targeted drug delivery system for breast cancer therapy. *Carbohydrate Polymers*. 277: 118822 (Pp. 16).

Panek, R., Szelağ, M., & Franus, W. (2021). Effect of the MCM-41 mesoporous silica on the microstructure and performance of cement matrix. *Journal of Building Engineering*. 44:103421 (Pp 10).

Pezzotti, G. (2021). 13-Surface chemistry of bioceramics: The missing key. A. Osaka and R. Narayan (Eds.), *In Elsevier Series on Advanced Ceramic Materials, Bioceramics* (pp 297-324). United States: Elsevier, Netherlands.

Peng, N., Ding, X., Wang, Z., Cheng, Y., Gong, Z., Xu, X., Gao, X., Cai, Q., Huang, S., & Liu, Y. (2019). Novel dual responsive alginate-based magnetic nanogels for onco-theranostics. *Carbohydrate Polymers*. 204:32-41.

Pillai, C., Paul, W., & Sharma, C. (2009). Chitin and chitosan polymers: Chemistry, solubility and fiber formation. *Prog. Polym. Sci.* 34:641–678.

Prenzel, T., Mehner, A, Lucca, DA., Qi, Y., Harriman, T. A., Mutlugünes, Y., & Swiderek, P. (2013). Chemical and mechanical properties of silica hybrid films from NaOH catalyzed sols for micromachining with diamond cutting tools. *Thin Solid Films*. 531:208–216.

Sakatani, Y., Boissière, C., Grosso, D., Nicole, L., Soler, I., Galo, J. & Sanchez, C. (2008). Coupling Nanobuilding Block and Breath Figures Approaches for the Designed Construction of Hierarchically Templated Porous Materials and Membranes. *Chemistry of Materials*. 20:1049–1056.

Shi, J., Xiao, Z., Kamaly, N., & Farokhzad, O. (2011). Self-Assembled Targeted Nanoparticles: Evolution of Technologies and Bench to Bedside Translation. *Accounts of Chemical Research*. 44:1123–1134.

Tahir, A. M., Murteza, S., Neyaz, A. M., Saquib, H. M., & Kumar, N. (2022). Chitosan as a responsive biopolymer in drug delivery. S. Hasnain, S. Beg and A. K Nayak (Eds.), *Chitosan in Drug Delivery, Academic Press* (pp. 389-410). United States: Elsevier, Netherlands.

Teng, L. W., Khor, E., Tan, T. K., Lim, L., & Tan, S. C. (2001). Concurrent production of chitin from shrimp shells and fungi, *Carbohydrate Research*. 332:305–316.

Trzeciak, K., Kaźmierski, S., Wielgus, E., & Potrzebowski, M. J. (2020). DiSupLo-New extremely easy and efficient method for loading of active pharmaceutical ingredients into the pores of MCM-41 mesoporous silica particles. *Microporous and Mesoporous Materials*. 308: 110506 (Pp. 17).

Tsai, M. L., Chen, R. H., Bai, S. W., & Chen W. Y. (2011). The storage stability of chitosan/tripolyphosphate nanoparticles in a phosphate buffer, *Carbohydrate Polymers*. 84: 756–761.

Yilmaz, T., Maldonado, L., Turasan, & H., Kokini, J. (2019). Thermodynamic mechanism of particulation of sodium alginate and chitosan polyelectrolyte complexes as a function of charge ratio and order of addition. *Journal of Food Engineering*. 254:42–50.

Zhao, S., Malfait, W., Jeong, E., Fischer, B., Zhang, Y., Xu, H., Emanuele, A., William, R., William, S., & Koebel, M. (2016). Facile One-Pot Synthesis of Mechanically Robust Biopolymer–Silica Nanocomposite Aerogel by Cogelation of Silicic Acid with Chitosan in Aqueous Media. *American Chemical Society*, 4:5674–5683.

Habilidades y herramientas distintivas de los estudiantes de ingeniería con mayor aceptación entre empleadores, de acuerdo con su modalidad educativa

Distinctive skills and tools of engineering students with greater acceptance among employers according to their educational modality

Dra. Nayali Argelia Polina-Mezquitic^{1*} , M.I.I. Mónica Paulina López-Arteaga¹

¹Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Saltillo, Boulevard Venustiano Carranza #2400, Colonia Tecnológico, C.P. 25280, Saltillo, Coahuila, México; npolina@itsaltillo.edu.mx , <https://orcid.org/0000-0002-0022-9169>; mlopez@itsaltillo.edu.mx;

*autor para correspondencia: Dra. Nayali Argelia Polina-Mezquitic, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Saltillo, correo: npolina@itsaltillo.edu.mx

Resumen

La investigación tuvo como objeto de estudio la aceptación que tienen los egresados con formación de modalidad en línea o presencial respecto de los empleadores y así determinar las competencias con que cuentan los estudiantes en la formación respectiva. Para la realización de la presente investigación se empleó la entrevista a profundidad, que se realizó a 12 empleadores de la región de Saltillo, Ramos Arizpe y Arteaga, Coahuila. Una vez realizado el estudio se encontró que los entrevistados sí tienen una preferencia acentuada por la contratación de los egresados que estudiaron en una modalidad presencial, especialmente por aquellos egresados del Instituto Tecnológico de Saltillo, debido a que según los entrevistados, cuentan principalmente con dos competencias, las cuales son: los conocimientos especializados que requiere la industria y una actitud positiva para adquirir nuevos conocimientos. Finalmente se concluye que tanto la modalidad de estudio, como la escuela de egreso del empleador, influyen en la aceptación que tienen los graduados para poder ser contratados en las empresas manufactureras de la región. Todo lo anterior debido al poco o nulo entendimiento que tienen los empleadores en el conocimiento de la formación académica de los egresados en línea.

Palabras clave: Modalidad educativa, habilidades, herramientas, empleadores, estudiantes de ingeniería.

Abstract

This research aimed to study the level of acceptance that university graduates face, considering their education in both online or traditional on-campus models, with respect to their employers, and therefore determine the competencies with which the students are equipped in each of these formats, respectively. In order to conduct the present study, a qualitative approach was applied, along with an ethnographic

design, for which an indepth interview was carried out. The interview was performed with a group of 12 employers from the region of Saltillo, Ramos Arizpe and Arteaga, Coahuila. Once the study was held, allowed us to discover that the interviewers do have a preference for hiring, favoring graduate students from a traditional face to face education, especially graduates from Instituto Tecnológico de Saltillo, due to their mastery of two competencies: specialized knowledge required by the Industry, and a positive attitude to continue increasing such knowledge. Finally it was concluded that both the study format and the university from where the employers graduated do have an influence in the hiring process at the manufacturing companies from the region, as a result of a poor or null understanding the employers have of the academic education of the graduates from online programs. Moreover, graduate students from the previously mentioned university have shown that they adapt better to the changes in the industry, owing to the fact that they've had a close exposure to the knowledge and work through their educational process within the competency-based education model. In de other hand, employees consider that the soft habilities must be inforced in all university graduates as same specialities studies in most former students.

Key words: education modalities, skills, tools, employers, engineering students.

Introducción

Las nuevas tecnologías han abierto posibilidades que antes ni siquiera se podían imaginar. Gracias a ellas, personas que viven en localidades con difícil acceso a la educación, pueden cursar todos (o casi todos) los niveles educativos de manera más sencilla. Es por ello que las instituciones educativas más prestigiosas de la región que ofertan estudios de ingeniería, brindan la posibilidad de que sus carreras puedan ser enseñadas en las dos modalidades educativas que se establecen en esta investigación; tradicional o presencial y en línea.

La educación en modalidad presencial es la tradicional y es la que se imparte en la gran mayoría de instituciones educativas, en ellas la relación entre estudiante y profesor es directa y frontal, son altamente conocidas las ventajas y desventajas de esta modalidad. Moreno que es citado por Rivera-Vargas, Alonso-Cano y Sancho-Gil (2017) menciona que la enseñanza presencial es el modelo de enseñanza tradicional que se imparte en un aula física. Esta proximidad física entre profesor y alumno permite una fácil interacción y una mayor comunicación. El docente puede captar inmediatamente el grado de atención y constatar el nivel de asimilación de sus alumnos; y variar la exposición para mejorarlos. Asimismo, pueden utilizarse medios tecnológicos como apoyo didáctico (p. 2).

Por su parte, Arboleda (2013) plantea el origen de la educación a distancia desde el punto de vista de la necesidad y las limitaciones que tenía la educación tradicional de incluir a todas (o casi todas) las personas, es así, y sostiene que el origen de la educación a distancia se sustenta en la búsqueda de flexibilidad, apertura e innovación que desde épocas muy antiguas se han dado para lograr que el proceso de enseñar y aprender pudiera darse sin que los estudiantes y el profesor se reunieran en el mismo recinto de un establecimiento educativo (p. 47).

La razón principal por la cual se decidió llevar a cabo esta investigación fue la de identificar y analizar la aceptación que los empleadores de la industria

manufacturera de la región, dan a los egresados de ingeniería que han estudiado en una modalidad en línea y una presencial. Además de conocer las competencias, habilidades y herramientas que los egresados de estas modalidades tienen, para poder ser contratados.

Esta investigación permitirá a las universidades conocer la situación actual en cuanto a aceptación de sus egresados de acuerdo a la modalidad en la que estudiaron su carrera, así como los motivos y las competencias que los empleadores señalan, de manera que todas estas áreas de oportunidad se puedan atender, permitiendo que todos los egresados tengan las mismas oportunidades, o bien, que identifiquen las áreas de oportunidad que tienen que atender.

Revisión bibliográfica

Educación Tradicional vs Educación A Distancia

La educación presencial o tradicional, es aquella conocida por la mayoría de las personas. Todo esto debido a los pocos cambios que ha sufrido a lo largo de los años en cuanto a la forma en que es practicada por los docentes y recibida por los estudiantes, todo ello a pesar de que ha sido ampliamente criticada en los últimos años por su deficiencia al ser impartida, así como por la poca accesibilidad que tiene en algunos lugares.

García (1999) sostiene que las deficiencias del sistema de educación tradicional además de no poder cumplir con la demanda de la enseñanza, se negaban a un cambio estructural de manera en que el estudiante pudiera tener un papel más activo, además de que también se resistían a una innovación de acuerdo a los tiempos y exigencias que la misma sociedad demandaba, la cual pedía nuevas formas de aprendizaje extramural y la búsqueda de sistemas educativos innovadores que pudiesen replantear las suposiciones existentes sobre la

educación. Así mismo, el autor afirma que la educación convencional es uno de los sistemas con mayor resistencia a los cambios.

Por otro lado, los autores Rivera-Vargas, Alonso-Cano y Sancho-Gil (2017) definen a la educación a distancia como una modalidad que permite el acto educativo mediante diferentes métodos, técnicas, estrategias y medios. Esta forma de estudio permite que el estudiante y el profesorado se encuentren separados físicamente y que su relación solamente sea ocasional de manera presencial. Esta relación presencial dependerá de la distancia, del número de estudiantes y del tipo de conocimiento que se imparta.

A pesar de todas las ventajas y desventajas de las diferentes modalidades de educación, éstas no deberían considerarse enfrentadas o en disputa sobre la superioridad de una u otra, ya que dependiendo del contexto en el cual se encuentren, la educación debería adaptarse a los estudiantes.

Es muy complicado tomar posición y afirmar de manera contundente si un tipo de educación es mejor que otra, ya que mientras los programas, actividades y docentes estén diseñados y capacitados para formar parte de una u otra el resultado será positivo. Es por ello que todos los autores coinciden en que la educación a distancia brinda experiencias positivas para el aprendizaje de los estudiantes.

Escuelas de educación superior

Para la SEP (2019), una escuela es un conjunto de recursos humanos y físicos que están organizados y que tiene como finalidad la impartición de educación a estudiantes de un mismo nivel educativo que tienen turnos y horarios específicos y la cual funciona bajo una autoridad la cual es reconocida como director o responsable.

Se entiende por nivel educativo “cada una de las fases que conforman un tipo educativo” (SEP, 2019, p. 8) estas fases en educación media superior y superior son independientes y pueden ser propedéuticas o terminales. Para fines de la presente investigación el nivel educativo en el cual se centrará el trabajo es en “educación superior”, la cual es definida por la SEP como la educación que se imparte posterior a la educación media superior y que está compuesta por los niveles: técnico superior universitario, licenciatura, especialidad, maestría y doctorado.

En México existen en la actualidad, 3,943,544 alumnos inscritos en escuelas de educación superior en una modalidad presencial o escolarizada. Mientras que 761,856 alumnos lo hacen en una modalidad no escolarizada, a distancia o en línea; mientras que en Coahuila un total de 105,315 jóvenes estudian el nivel educativo de educación superior en 179 escuelas, de los cuales 100,032 estudian una licenciatura diferente a la “escuela normal” o algún posgrado (SEP, 2019).

La OCDE (2019) sostiene que, la mayoría de las universidades no acostumbran ligar su labor con los empleadores y otros agentes sociales necesarios para fortalecer la preparación de los jóvenes y fortificar las necesidades del mercado, además, algunas instituciones no consideran en sus planes las prácticas profesionales ni de servicio social, excepto por algunas pocas escuelas consideradas como líderes que sí realizan todas estas actividades, en palabras propias de la OCDE:

La educación superior es clave para el desarrollo de las competencias y los conocimientos avanzados, que son fundamentales para las economías modernas. Gracias a la educación superior, los estudiantes desarrollan competencias y conocimientos técnicos, profesionales y disciplinares

específicos avanzados, así como competencias transversales que les cualifican para una variedad de ocupaciones laborales (OCDE, 2019, p. 8).

La presente investigación se centrará específicamente en los egresados de educación superior que estudiaron alguna carrera de ingeniería, los cuales en México, son formados en Instituciones de Educación Superior (IES). Las cuales pueden desempeñarse como universidades del sector público o del sector privado. Y que de acuerdo a la Asociación de Universidades e Instituciones de Educación Superior (ANUIES, 2018), tan solo en el año 2018 había 44,590 estudiantes de ingeniería, tan solo en el Estado de Coahuila, tanto de universidades públicas como privadas.

Competencias y Competencias Laborales

Coloquialmente, una competencia se basa en la solución de problemas que ocurren o pudieran ocurrir en la vida diaria de los individuos, es decir, la capacidad de respuesta ante una situación determinada. Mientras que la competencia laboral se centra en la solución de problemas del ámbito en el cual se desarrolla profesionalmente el individuo. Se puede decir que ambos términos se complementan, ya que, para poder responder a situaciones laborales, generalmente se repiten patrones de circunstancias similares ocurridas en la vida diaria.

De acuerdo a Díaz-Barriga (2011), la aplicación del término competencias (en educación) es reciente y su término se refiere a:

impulsar que la educación formal ofrezca resultados tangibles, resultados que se traduzcan en el desarrollo de determinadas habilidades para incorporarse al mundo del trabajo de manera eficaz. Se trata de un tema propio del momento actual porque responde a múltiples influencias de la sociedad de ahora, en particular de una economía globalizada que en los hechos, al comparar la productividad de los diferentes países con independencia de su nivel de escolaridad coloca a los trabajadores y hasta a los profesionistas, en una permanente comparación de sus capacidades (p. 5).

En el mismo orden de ideas, Mertens (1996) afirma que el concepto de competencia laboral emergió en los años ochenta con cierta fuerza en algunos países industrializados, sobre todo en aquellos que venían arrastrando mayores problemas para relacionar el sistema educativo con el productivo, como una respuesta ante la necesidad de impulsar la formación de la mano de obra. El término competencia laboral de acuerdo a la OIT (2012) es, toda aquella capacidad efectiva para llevar a cabo exitosamente una actividad laboral que ya ha sido identificada.

Desde su adopción, las competencias se han clasificado de muchas maneras, a continuación, se mencionan algunas de ellas. En la Tabla 1 se muestra el modelo propuesto por Spencer y Spencer, del lado izquierdo de la tabla, se observan los grupos o categorías que propone, y del lado derecho presenta algunas competencias propuestas dependiendo de la categoría a la que pertenece.

Tabla 1. Modelo de Spencer y Spencer.

Grupos	Competencias genéricas
Competencias de desempeño y operativas	<ul style="list-style-type: none"> • Orientación al resultado • Atención al orden, calidad y perfección • Espíritu de iniciativa • Búsqueda de información
Competencias de ayuda y servicio	<ul style="list-style-type: none"> • Sensibilidad interpersonal • Orientación al cliente
Competencias de influencia	<ul style="list-style-type: none"> • Persuasión e influencia • Conciencia organizativa • Construcción de relaciones
Competencias directivas	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo de los otros • Actitudes de mando: asertividad y uso del poder formal • Trabajo en grupo y cooperación • Liderazgo de grupos
Competencias cognitivas	<ul style="list-style-type: none"> • Pensamiento analítico • Pensamiento conceptual • Capacidades técnicas, profesionales y directivas
Competencias de eficiencia personal.	<ul style="list-style-type: none"> • Autocontrol • Confianza en sí mismo • Flexibilidad • Hábitos de organización

Nota: Tomado de Gil (2007, p. 86).

Por su parte, Gil (2007) muestra el modelo que Hooghiemstra realiza, el cual se observa en la Tabla 2 y consiste en una clasificación de las competencias que se deben poseer de acuerdo con los puestos de trabajo.

Tabla 2. Modelo de Hooghiemstra.

Puesto	Competencias
Ejecutivos	<ul style="list-style-type: none"> • Razonamiento estratégico • Liderazgo del cambio • Gestión de las relaciones
Directores	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibilidad • Introducción al cambio • Sensibilidad interpersonal • Delegación de responsabilidades • Trabajo en equipo • Transferibilidad a diferentes entornos geográficos
Empleados	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibilidad • Motivación para buscar información y capacidad de aprender • Orientación hacia el logro • Motivación para el trabajo bajo presión del tiempo • Colaboración en grupos multidisciplinarios • Orientación hacia el cliente

Nota: Tomado de Gil (2007, p. 87).

El proyecto Tuning que ha sido altamente aceptado si se habla de competencias; propone dos tipologías entre ellas, diferenciadas como: Genéricas y Específicas. Así mismo señala que las genéricas son aquellas “compartidas” es decir, que se adquieren sin importar la carrera o especialidad que se estudie, y éstas a su vez se dividen en tres grupos señalados en la Tabla 3; por otro lado, las competencias específicas son aquellas que se relacionan con cada área temática y de acuerdo con el campo de estudio que se elige.

Tabla 3. Modelo del proyecto Tuning.

Competencias instrumentales	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de análisis y síntesis • Capacidad de organizar y planificar • Conocimientos generales básicos • Conocimientos básicos de la profesión • Comunicación oral y escrita en la propia lengua • Conocimiento de una segunda lengua • Habilidades básicas de manejo del ordenador • Habilidades de gestión de la información (habilidad para buscar y analizar información proveniente de fuentes diversas)
------------------------------------	--

	<ul style="list-style-type: none"> • Resolución de los problemas • Toma de decisiones
Competencias interpersonales	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad crítica y autocrítica • Trabajo en equipo • Habilidades interpersonales • Capacidad de trabajar en un equipo interdisciplinar • Capacidad para comunicarse con expertos de otras áreas • Apreciación de la diversidad y multiculturalidad • Habilidad de trabajar en un contexto internacional • Compromiso ético
Competencias sistémicas	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica • Habilidades de investigación • Capacidad de aprender • Capacidad para adaptarse a nuevas situaciones • Capacidad para generar nuevas ideas (creatividad) • Liderazgo • Conocimiento de culturas y costumbres de otros países • Habilidad para trabajar de forma autónoma • Diseño y gestión de proyectos • Iniciativa y espíritu emprendedor • Preocupación por la calidad • Motivación de logro

Nota: Tomado de González y Wagenaar (2003, pp. 83-84).

Existen además otras competencias relevantes, creadas por Lombardo y por Echingen en 1991 y conocidas como competencias de Lominger (por la combinación de los apellidos de los autores). Pesantez (2013), describe el modelo de Lominger como las competencias que tienen características, habilidades y herramientas observables y medibles que tienen todas las personas, además y de forma adicional explica que cada una de estas competencias tienen niveles de desarrollo diferentes, dependiendo de la experiencia de cada uno de los sujetos y que con base en estos niveles, se hacen distinciones de los rendimientos excepcionales, los rendimientos normales y los rendimientos básicos que las personas pueden tener y perfeccionar dentro de las organizaciones. En la Tabla 4 se enlistan las competencias de Lominger.

Tabla 4. Competencias de Lominger.

1 Accesibilidad	35 Empuje por obtener resultados
2 Administración de innovaciones	36 Equidad con colaboradores directos
3 Administración de procesos	37 Equilibrio entre trabajo y vida personal
4 Administración del tiempo	38 Establecimiento de prioridades

5	Administración y medición del trabajo	39	Ética y valores
6	Agilidad organizativa	40	Habilidad de informar
7	Agudeza en los negocios	41	Habilidad de motivar personas
8	Agudeza estratégica		Habilidad de relacionarse con sus
9	Ambición de hacer carrera	42	compañeros
10	Apertura hacia los demás	43	Habilidad organizativa
11	Aprendizaje al vuelo	44	Habilidades de mando
12	Aprendizaje personal	45	Habilidades funcionales/técnicas
13	Aprendizaje técnico	46	Habilidades para hacer presentaciones
14	Astucia en las relaciones interpersonales	47	Humor
15	Astucia política	48	Integridad y confianza
16	Autoconocimiento	49	Manejo a través de sistemas
17	Autodesarrollo	50	Manejo de conflictos
18	Autosuficiencia	51	Manejo de la diversidad
19	Calidad en las decisiones	52	Manejo de la paradoja
20	Capacidad de confrontar a colaboradores directos	53	Manejo de situaciones ambiguas
21	Capacidad intelectual	54	Manejo de visión y propósito
22	Capacidad para escuchar	55	Negociación
23	Comodidad al interactuar con ejecutivos superiores	56	Orientación hacia el cliente
24	Compasión	57	Orientado a la acción
25	Compostura	58	Paciencia
26	Comprensión de otras personas	59	Perseverancia
27	Comunicación escrita	60	Perspectiva
28	Contratación y dotación de personal	61	Planificación
29	Creación de equipos efectivos	62	Preocupación por colaboradores directos
30	Creatividad	63	Relación con jefes
31	Delegación	64	Resolución de problemas
32	Desarrollo de colaboradores directos y otros	65	Sistemas de trabajo total
33	Determinación del carácter de las personas	66	Toma de decisiones oportuna
34	Dirección de personal	67	Valentía gerencial

Nota: Tomado de Chavez (2016, p.51).

En cuanto a las competencias que se solicitan a los ingenieros, se mencionará el trabajo de Gutarra (2015) quien señala 45 competencias específicas, divididas en 9 genéricas que son exigidas por los organismos internacionales a los ingenieros industriales, en la Tabla 5 se puede apreciar esta información.

Tabla 5. Competencias exigidas al ingeniero industrial por los organismos internacionales de acreditación.

CONOCIMIENTOS, HABILIDADES, ACTITUDES Y VALORES "EL INGENIERO INDUSTRIAL TIENE HABILIDAD/CAPACIDAD/DISPOSICIÓN/ACTITUD PARA..."	
GENÉRICOS	ESPECÍFICOS
Investigar, generar y gestionar información y datos	1. Investigar y organizar información y datos. 2. Diseñar y conducir experimentos científicos. 3. Interpretar, analizar, integrar y evaluar información y datos.
Analizar, planear y solucionar problemas reales en ingeniería	4. Aplicar matemáticas, física, química y otras materias asociadas a la ingeniería. 5. Aplicar tecnologías, técnicas y herramientas modernas de ingeniería. 6. Identificar y entender problemas y necesidades reales del cliente o mercado. 7. Analizar problemas y sistemas complejos (análisis y abstracción). 8. Pensar en forma lógica, conceptual, deductiva y crítica. 9. Modelar, simular sistemas y realidades complejas. 10. Crear, innovar (creatividad) 11. Decidir (tomar decisiones) 12. Pensar con enfoque multidisciplinario, interdisciplinario, de sistemas.
Diseñar sistemas para resolver necesidades	13. Diseñar/desarrollar de modo interdisciplinario sistemas y productos complejos. 14. Medir y evaluar procesos, productos, sistemas.
Competencias complementarias	15. Dominar un área de especialidad. 16. Aplicar conocimientos de calidad, ergonomía y seguridad industrial. 17. Aplicar conocimientos de ciencias sociales y humanidades. 18. Aplicar conocimientos de ingeniería económica. 19. Aplicar conocimientos de producción, fabricación y marketing de productos. 20. Aplicar conocimientos de materiales, componentes y sus aplicaciones. 21. Aplicar conocimientos de leyes de la ingeniería. 22. Identificar, evaluar y controlar el riesgo en ingeniería, 23. Planear organizar, dirigir y controlar personal, procesos, proyectos, empresas. 24. Asesorar, consultar, auditar y evaluar procesos, sistemas, empresas. 25. Capacitar, educar, formar, enseñar.
Comunicarse efectivamente	26. Comunicarse efectivamente en forma oral, gráfica y por escrito. 27. Comunicarse en varios idiomas modernos, en forma oral, gráfica y por escrito. 28. Planear, conducir y practicar debates sobre temas actuales.
Relacionarse y trabajar en equipo	29. Trabajar en equipos y entornos internacionales. 30. Liderar, dirigir personas, actividades, proyectos, empresas. 31. Planear, conducir y practicar negociaciones. 32. Escuchar activamente y mostrarse con empatía. 33. Mantener y desarrollar relaciones con personas y entidades. 34. Afrontar adecuadamente la crítica y el conflicto.
Fomentar el desarrollo propio y mejora continua	35. Comprometerse a aprender por cuenta propia y a lo largo de toda la vida. 36. Comprometerse con la autocrítica, auto-evaluación y mejora. 37. Comprometerse con la disciplina. 38. Mostrarse con autoestima y seguridad en sí mismo.

	39. Mostrarse con iniciativa y espíritu emprendedor. 40. Adaptarse al cambio.
Comprometerse con la ética y la responsabilidad profesional, legal, social y medioambiental	41. Comprometerse con la ética profesional, social y legal. 42. Comprometerse con el medioambiente y el desarrollo sostenible. 43. Comprometerse con la calidad y seguridad. 44. Concienciarse de los problemas contemporáneos.
Valorar la diversidad social, artística y cultural	45. Respetar la diversidad social, artística y cultural y fomentar la solidaridad.

Nota: Tomado de Gutarra (2015, pp. 37,38).

Los empleadores y su perspectiva

De acuerdo a la OIT (2006) en algunos países como Argentina, Canadá, Colombia, Tailandia, etcétera, incluido México, la palabra empleador se suele definir de manera muy simple por la ley, en estos casos un empleador es una persona que emplea a un trabajador. Dos de las definiciones más completas que se encontraron fueron las de Filipinas y la de Botswana, las cuales incluyen en sus conceptos a las personas responsables de una empresa o negocio, esto resulta interesante puesto que para la realización de la presente tesis los empleadores se caracterizarán por ello, por lo que: se definirá a un empleador como una persona con cierto grado de influencia en la contratación de personal, para que labore en la misma empresa manufacturera donde éste se desarrolla.

La OIT (2004) define la empleabilidad como aquellas competencias y cualificaciones que son transferibles y que refuerzan la capacidad de las personas para aprovechar oportunidades tanto de educación como de formación laboral que se presenten con la finalidad de encontrar y conservar un trabajo decente, desarrollarse, cambiar o adaptarse a la evolución de la tecnología y a las condiciones que se requieren en un determinado empleo.

De acuerdo a Equipo Vértice (2008), la selección de personal puede definirse como un proceso en cual se elige de entre varias personas aquella que vaya a ocupar un puesto, siempre que se haya estimado previamente la utilidad de crear, mantener o transformar ese puesto. Además, el autor aclara que la persona que ha

de ocupar este cargo no será aquella considerada como “mejor” candidato, sino que será la que cumpla con las características que se adecúen más al perfil que tiene el puesto que se vaya a ocupar; por lo tanto, el perfil deberá cumplir con las capacidades, conocimientos, habilidades, herramientas o aptitudes requeridas y además la persona elegida deberá integrarse correctamente al ambiente laboral.

De acuerdo a varios autores, las competencias de mayor importancia de los egresados de ingeniería se basan en las habilidades sociales, tales como la capacidad de trabajo en equipo, la capacidad de comunicación, la capacidad analítica y decisión, la adaptabilidad, además dentro de las habilidades académicas se menciona el conocimiento de un segundo idioma.

Como se ha demostrado, los empleadores conocen con exactitud las competencias que valoran, o bien, que consideran importantes en la empleabilidad, sin embargo, cuando se toca el tema de la metodología que se tiene para poder realizar esta contratación, las opiniones y sugerencias que realizan los autores son muy variables, ya que algunos recomiendan desde las técnicas más usuales hasta las técnicas que utilizan las redes sociales.

Materiales y métodos

Para el presente escrito, se realizaron 10 entrevistas en el área de trabajo correspondiente a cada uno de los involucrados y dos en diferentes cafés de la región, ya que el ingreso a las áreas de trabajo se consideraba complicado por los horarios de trabajo de los participantes y el tipo de actividades de la empresa. Para el ingreso a las fábricas no se requirió equipo especializado, ya que el acceso fue solamente al área de oficinas; aunque sí se pasó por un riguroso proceso de acceso a las plantas, monitoreado por las mismas empresas. Las empresas a las que se tuvo acceso son del giro manufacturero y todas se dedican a diferentes actividades. Es importante mencionar que todos los entrevistados tienen una cierta influencia en

la contratación de nuevo personal, ya que éste fue un requisito indispensable para considerarlos como empleadores.

Las entrevistas llevadas a cabo, fueron efectuadas bajo autorización de los involucrados, de manera personal y por medio de una grabación de voz, la cual, posteriormente fue transcrita de forma literal, cabe recalcar que a los participantes se les indicó que la información personal proporcionada sería anónima y su utilización sería estrictamente con fines académicos. Para el análisis de las entrevistas se pasó la transcripción al software ATLAS.ti versión 7.5.4 en el cual se formaron códigos y sub códigos con los cuales se formaron las categorías correspondientes, se crearon relaciones entre códigos y posteriormente familias entre ellos. De manera que en la presente investigación se han definido 6 categorías y 29 subcategorías.

Resultados

Para la realización del presente, se realizaron 12 entrevistas a empleadores de la región; cuatro laboran en empresas de la ciudad de Saltillo, seis en la ciudad de Ramos Arizpe, y dos pertenecen al área de Arteaga; 7 de los entrevistados pertenecen al sexo masculino y 5 al sexo femenino, sus edades oscilan entre los 27 y los 60 años; además, la antigüedad que tienen en sus puestos actuales, fluctúa en un intervalo de 2 meses y 20 años, mientras que su experiencia oscila entre los 2 y los 36 años.

En la región las actividades que más proliferan son aquellas relacionadas con la industria automotriz, sin embargo, para esta investigación solo ocho de las organizaciones están relacionadas directamente con este rubro. Estas empresas se dedican a la fabricación de asientos, chasis, componentes para motores, carrocería, pintura, etc. dos de ellas pertenecen al ramo de la fundición, otra más corresponde a la industria química y la restante fabrica robots industriales.

De acuerdo a los datos proporcionados, todos de los empleadores egresaron de una modalidad presencial al estudiar la licenciatura. Cinco de los empleadores cuentan con estudios de posgrado, también en modalidad presencial; dos de ellos manifestaron estar estudiando actualmente el grado de maestría y de éstos solamente uno la está realizando en una escuela que la ofrece en línea. Considerando que al empleador con menor experiencia laboral que se entrevistó cuenta con dos años de egreso y que el tipo de estudio en línea no es nuevo en la región; es extraño que no se haya podido contactar con ningún entrevistado que hubiera egresado de una modalidad a distancia y que realizara actividades de empleador.

Nueve de los doce entrevistados declaran que los egresados a quienes contratan han estudiado en la modalidad presencial. Mientras que otros dos reconocen que sí tienen una inclinación marcada por la modalidad presencial y uno más comentó que dependiendo del tiempo de egresado y el puesto que vaya a cubrir, es la relevancia que se le da a este punto.

Desde el punto de vista de los empleadores, las competencias que tienen los egresados de una modalidad presencial junto con el número de menciones, son las siguientes: trabajo en equipo (5), conocimiento teórico (4), manejo de software (3), desarrollo interpersonal (2), comunicación oral y escrita (2), idiomas (1), valores (1), capacidad de análisis (1), solución y comprensión de problemas (1), adaptabilidad (1), flexibilidad al cambio (1), trabajo por objetivos (1), sentido de pertenencia (1), manejo de máquinas y herramientas (1), multidisciplinados (1), conocimiento de temas específicos (1), liderazgo (1), disciplinados (1), habilidades de interacción en diferentes áreas (1).

Por otro lado, las competencias, habilidades y herramientas que se mencionaron con mayor frecuencia en la modalidad en línea son: autodidáctica (4), disciplina (3), cumplimiento del logro (3), organización (3), conocimiento teórico (2),

adaptabilidad (1), creatividad (1), solución de problemas (1), objetividad (1), uso de herramientas electrónicas/software (1), capacidad de análisis (1).

Continuando con el análisis, se observa que los empleadores son egresados de las siguientes instituciones educativas: Instituto Tecnológico de Saltillo (ITS conocido como “Tec Saltillo”, 8 egresados), Instituto Tecnológico de La Laguna (ITL un egresado), Universidad Tecnológica de Coahuila (UTC, un egresado), Universidad del Valle de México (UVM, un egresado), Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM mejor conocido en la región como “Tec de Monterrey”, un egresado). Cabe mencionar que todas estas escuelas tienen sede en el área metropolitana de la ciudad de Saltillo a excepción del Instituto Tecnológico de La Laguna que se ubica en la ciudad de Torreón Coahuila, sin embargo, es importante contextualizar que esta institución pertenece al Tecnológico Nacional de México (TecNM), esto quiere decir que trabaja bajo el mismo esquema y se rige igual que el ITS, por lo que se les podría considerar escuelas hermanas.

La mayoría de los empleadores (9), dijeron tener preferencia por los sustentantes de su misma escuela, además de ello afirmaron que los egresados de la institución educativa de su preferencia generalmente cumplen con los requisitos que el puesto exige, entre otros motivos. Todas las universidades mencionadas, junto con el número de menciones fueron: Instituto Tecnológico de Saltillo (11), Universidad Autónoma de Coahuila (3), Universidad Tecnológica de Coahuila (3), Universidad Autónoma del Noreste (2), Tecnológico de Monterrey (1), Universidad del Valle de México (1). Los entrevistados, dieron como respuesta dos motivos principales por los que contratan egresados de una cierta institución, estas razones primordiales son: la preparación académica que tienen los estudiantes y la actitud que se tiene frente al trabajo que se deberá desarrollar.

Para poder detectar las competencias que los empleadores detectan más desarrolladas en los egresados de ingeniería se realizó una pregunta general que

cita: “Sin importar la escuela de egreso, la modalidad, ni la carrera ¿Cuáles son las competencias, habilidades y herramientas que detecta más desarrolladas en los egresados de ingeniería?”. Las respuestas que dieron son las siguientes: conocimientos especializados (7), liderazgo (6), trabajo en equipo (5), conocimiento de software (4), actitud (4), segundo idioma, inglés (2), solución de problemas (2), comunicación oral y escrita (2), conocimientos básicos necesarios (2), flexibles/adaptables al cambio (2), confianza (2), titulados (2), autodidactas (2), multifuncionales (1), manejo del estrés (1), proactivos (1).

Por estas razones; ocho empleadores comentaron no tener dificultades al momento de que los egresados adaptaran las competencias a sus puestos de trabajo, mientras que cuatro, comentaron que sí era difícil esta adaptación ya que los estudiantes no tienen suficientes bases para esto. Finalmente, las competencias que más se desarrollan una vez que el egresado es contratado, son: trabajo en equipo (5), comunicación oral y escrita (4), administración de personal (3), seguridad en sí mismos (3), liderazgo (2), toma de decisiones (2), empatía (2), proyectos (1), manejo de software especializados (1), interés (1), inglés/ segundo idioma (1), adaptabilidad (1), capacidad de análisis y síntesis (1), solución de problemas (1).

En cuanto a la deficiencia en las competencias de los egresados, los entrevistados mencionan: conocimiento especializado (4), trabajo en equipo (3), falta de responsabilidad (3), inglés/segundo idioma (3), trabajo bajo presión (2), comunicación efectiva (2), dibujo (2), socialización (2), falta de confianza (1), software básicos (office) (1), creatividad (1), desarrollo de proyectos (1), pensamiento crítico (1), toma de decisiones (1), tolerancia a la frustración (1), soberbios (1), humildad (1), exceso de confianza con los empleados (1).

Ya que los entrevistados muestran claramente una preferencia marcada por los egresados de una cierta institución educativa, también se indagó sobre las competencias que tienen éstos, para ser merecedores de esa predilección, los

resultados obtenidos fueron: conocimiento técnico/especializado (9), apertura al aprendizaje (4), adaptabilidad (4), inglés/segundo idioma (3), liderazgo (3), análisis y solución de problemas (3), trabajo en equipo (3), actitud/disposición (3), trabajo bajo presión (3), cumplimiento de objetivos (2), confianza (1), creatividad (1), investigación (1), multi-habilidades (1), comunicación oral y escrita (1), práctica (1), ética (1).

Las competencias más valoradas por los empleadores, son: trabajo en equipo (6), valores (5), comunicación efectiva (4), aprendizaje continuo (2), conocimientos básicos (2), idiomas (2), actitud (2), disponibilidad (2), capacidad analítica (1), conocimiento técnico (1), iniciativa (1), creatividad (1), proactividad (1), trabajo por objetivos (1), sentido de pertenencia (1), uso de paquetes computacionales (1), liderazgo (1), trabajo bajo presión (1), pensamiento crítico (1), adaptabilidad (1), influencia en los demás (1), comportamiento ético (1).

Conclusiones

Nueve de los doce empleadores tienen una preferencia acentuada por la contratación de egresados que hayan realizado su preparación profesional en una modalidad presencial. Esta predilección se debe principalmente a que, la escolaridad presencial permite que los estudiantes se mantengan alertas durante las clases, disminuyendo las posibilidades de que ésta se pierda, además de ello, esta modalidad facilita que se aclaren las dudas de los alumnos al encontrarse frente al docente, pudiendo hacer preguntas en el momento en que se genera la cuestión; también el contacto con sus compañeros posibilita el intercambio de ideas y debates entre pares ampliando sus conocimientos y facilitando que el docente intervenga en caso de que se presenten afirmaciones erróneas, de igual manera, proporciona el acceso a las distintas opiniones (de un mismo tema) entre diferentes maestros.

De acuerdo a los empleadores; los egresados que estudiaron una modalidad presencial, cuentan con una variedad mayor de competencias desarrolladas que aquellos que estudiaron una modalidad en línea, así mismo, los primeros cuentan con la mayoría de las habilidades y herramientas que también son mencionadas en los egresados de la escolaridad en línea. Además de todo esto, el manejo y uso de software es una competencia mencionada con mayor frecuencia como adquirida de forma presencial. En conclusión, la modalidad de estudio de la que un empleador egresó, influye directamente en la contratación de individuos elegidos por él.

Ocho de los entrevistados aceptaron sentirse influenciados por su escuela de egreso debido a que conocen la forma de trabajo de los docentes y los planes de estudio que se tienen; la escuela de preferencia de los empleadores es el Instituto Tecnológico de Saltillo (mencionada 11 veces). En conclusión, la institución educativa de la cual egresa un empleador está directamente relacionada con la influencia que tienen por la contratación de individuos graduados de esa misma universidad, ya que consideran tener motivos de peso, para defender esta elección, estos argumentos se sustentan además, con el desempeño que tienen los egresados en su trabajo en las empresas donde son contratados.

Muchas de las competencias, habilidades y herramientas que tienen los egresados sin importar la institución de egreso ni la modalidad estudiada coinciden con las competencias que más se desarrollan una vez que se les contrata. Es por este motivo que, la mayoría de los empleadores comentaron no tener dificultades importantes al momento de apoyar a los contratados a evolucionar las competencias laborales que les serán de utilidad para su desarrollo en la empresa contratista. En suma, los empleadores expresaron que el trabajo en el perfeccionamiento de las competencias con las que el sustentante egresa y las que utilizará mayormente no presentan una carga pesada para ellos, ya que la mayoría de estas capacidades ya las tiene el sustentante cuando egresa.

En concreto, los empleadores consideran que las competencias que deben especializarse sin importar el campo de acción de los ingenieros de la región se

encuentra principalmente en el área de los conocimientos especializados y el trabajo en equipo; aunque los conocimientos no pueden enfocarse a un tema específico (en este caso a la industria automotriz) porque, aunque es mayoría también existen otros campos, el tema de trabajo en equipo sí es diferente, ya que como se comentó en otros capítulos, los estudiantes están acostumbrados a repartirse las actividades escolares llamándolas “trabajo en equipo” y cuando llegan a la planta, aprenden de manera activa que lo que hacían con anterioridad era incorrecto, lo cual les dificulta la rápida respuesta en los entregables que les exigen.

Finalmente, en cuanto a las competencias fuertes, es necesario mencionar que aunque los empleadores citan una gran cantidad de competencias que se valoran, una de las mayormente referidas y que poseen los graduados de su escuela de preferencia, es la apertura al aprendizaje, lo cual implica que estos egresados, son accesibles a instruirse en todos aquellos nuevos conocimientos que enfrentan.

Trabajos futuros

- Ampliar la muestra del estudio, de manera que la generalización sea más exacta, además de que la investigación incluya observaciones de entrevistas entre empleadores y sustentantes de las diversas universidades.
- Investigar si los egresados tanto de la modalidad presencial y la modalidad en línea consideran que las competencias se desarrollan correctamente desde el punto de vista de ellos mismos.
- Se aconseja que se realicen estudios mixtos y/o longitudinales de la información presentada en el presente documento, de manera que la investigación se vea mayormente favorecida y complementada.
- Luego de la pandemia del virus COVID19 que ha atacado a diversos países del mundo desde el año 2019 y al país desde el presente 2020; y una vez que las escuelas de todos los niveles se han visto en la necesidad de cerrar

sus puertas, dejando de impartir clases de manera presencial, se considera muy importante realizar un nuevo estudio con la intención de conocer la opinión de los empleadores y cómo ésta se ha visto afectada, en caso de que así sea.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

Arboleda, N. (2013). La Nueva Relación entre Tecnología, Conocimiento y Formación Tiende a Integrar Las Modalidades Educativas. En N. Arboleda y C. Rama (coords). *La educación superior a distancia y virtual en Colombia: Nuevas realidades*. (pp.47-64). Colombia: Virtual Educa.

Asociación Nacional de Universidades e Instituciones de Educación Superior [ANUIES]. (2018). *Información Estadística de Educación Superior*. Recuperado de: <http://www.anuiem.mx/informacion-y-servicios/informacion-estadistica-de-educacion-superior>

Chavez, J. (2016). *Diseño de perfiles de cargo por competencias para la selección de personal del Sistema de Educación a Distancia de la Universidad Tecnológica Equinoccial en Quito*. (Tesis de maestría). Universidad Andona Simón Bolívar.

Díaz-Barriga, Á. (2011). Competencias en educación. Corrientes de pensamiento e implicaciones para el currículum y el trabajo en el aula. En *Revista Iberoamericana de Educación Superior*. 2(5), 3-24. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/2991/299123992001.pdf>

Equipo Vértice. (2008). *Selección de personal*. España: Publicaciones Vértice S.L.

- García, L. (1999). Historia de la Educación a Distancia. En *Revista Iberoamericana de Educación a Distancia*. 2 (1), 11-40. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/28108743_Historia_de_la_Educacion_a_Distancia/fulltext/0e605f99f0c46d4f0ab76173/Historia-de-la-Educacion-a-Distancia.pdf
- Gil, J. (2007). La evaluación de competencias laborales. En *Educación XXI*. 10, 83-106. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/706/70601006.pdf>
- González, J. y Wagenaar, R. (2003). *Tuning Educational Structures in Europe. Informe Final Proyecto Piloto Fase 1*. España y Países Bajos.
- Gutarra, F. (2015). *Introducción a la ingeniería industrial*. Huancayo: Fondo Editorial de la Universidad Continental.
- Mertens, L. (1996). *Competencia laboral: sistemas, surgimiento y modelos*. Montevideo: Cinterfor
- Oficina Internacional del Trabajo [OIT]. (2004). *Empleabilidad*. Recuperado de: <https://www.oitcinterfor.org/?q=taxonomy/term/3406>
- Oficina Internacional del Trabajo [OIT]. (2006). *Informe V (I). La relación del trabajo. Quinto punto del orden del día*. Ginebra, Suiza: Conferencia Internacional del Trabajo 95.^a reunión.
- Oficina Internacional del Trabajo [OIT]. (2012). *¿Qué es una competencia laboral?* Recuperado de: <https://www.oitcinterfor.org/p%C3%A1gina-libro/1-%C2%BFqu%C3%A9-competicencia-laboral>
- Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos [OCDE]. (2019). *Higher Education in Mexico: Labour Market Relevance and Outcomes*. Higher Education. OECD Publishing. Paris. DOI: <https://doi.org/10.1787/9789264309432-en>

Pesantez, D. (2013). *Diseño de un plan de sucesión y de carrera para los cargos operativos del Banco Internacional S.A.* (Tesis inédita de licenciatura). Pontificia Universidad Católica de Ecuador.

Rivera-Vargas, P., Alonso-Cano, C. y Sancho-Gil, J. (2017). Desde la educación al e-learning: emergencia, evolución y consolidación. En *Revista Educación y Tecnología*. 1(10), 1-13. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6148504>

Secretaría de Educación Pública [SEP]. (2019). Principales cifras del Sistema Educativo Nacional. Recuperado de: https://www.planeacion.sep.gob.mx/Doc/estadistica_e_indicadores/principales_cifras/principales_cifras_2018_2019_bolsillo.pdf