



CONTENIDO No. 79

Caracterización quimioestratigráfica en el contacto de las formaciones Buda/Eagle Ford, sobre el Levantamiento Burro-Peyotes, en la carretera Nueva Rosita-Allende

Desde el genoma a las proteínas del Virus del Síndrome Respiratorio Agudo Severo-Coronavirus 2 (SARS-CoV-2), una revisión

Hibridación en los procesos de soldadura: Una revisión

Aplicaciones Emergentes de Nanopartículas de ZnO en Procesos de Fotodegradación, Review.

Implicaciones ambientales y toxicológicas de los hidrocarburos aromáticos policíclicos: una revisión.

Revisión del aislamiento del cannabidiol mediante técnicas de encapsulación

Efectos de los diferentes parámetros y procesos sobre la resistencia al desgaste por deslizamiento de la familia Hastelloy.

Revisión general del desgaste en seco bola en superficie en aceros microaleados al Nb sometidos a tratamiento térmico de solución.

Cisticercosis hepática... ¿una enfermedad desafiante?

El paradigma de la educación a distancia: Clases Digitales desde diferentes perspectivas. Transformaciones socioculturales en el marco de la cultura digital. Prácticas y actores educativos.



ISSN: 2683-1848

Publicada desde 2005

CienciAcierta, año 20, No. 79, julio-septiembre de 2024, 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, 14 de agosto de 2024.

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

Comité técnico editorial nacional e internacional

Dr. Jesús Alberto Montalvo Morales

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

Juan Carlos Centeno Maldonado

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

Dra. Gabriela De La Peña Astorga

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

Dra. Virginia Nevárez Moorillón

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

Dr. Gilberto Aboites Manrique

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

Dra. Arely Prado Barragán

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

Dra. Irma Delia García Calvillo

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

Dr. Gerardo Gutiérrez Sánchez

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

Dr. Pablo Ruiz Flores

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

Dr. Guillermo Picó

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

Dr. José González Tovar.

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

Dr. Luis Huesca Reynoso

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

Dra. Elda Patricia Segura Cenicerós.

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

Dr. Manuel Gil Antón

Educación
El Colegio de México
mgil@colmex.mx

Dr. Gustavo Félix Verduzco.

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

Dra. Laura Elena Zendejas Frutos

Educación
INEE
laura.zendejas@inee.edu.mx

CONTENIDO

Caracterización quimioestratigráfica en el contacto de las formaciones Buda/Eagle Ford, sobre el Levantamiento Burro-Peyotes, en la carretera Nueva Rosita-Allende	
Chemostratigraphic characterization at the contact of the Buda/Eagle Ford formations, on the Burro-Peyotes Uplift, on the Nueva Rosita-Allende highway	5
<i>Jesús Antonio Blanco Moreno*, Roberto Díaz Martínez, Antonio Rodríguez Vega, Yuri Almaguer Carmenates, José Alberto Batista Rodríguez, Ramón Yosvanis Batista Cruz, Alejandra Guadalupe Gutiérrez Alejandro</i>	
Desde el genoma a las proteínas del Virus del Síndrome Respiratorio Agudo Severo-Coronavirus 2 (SARS-CoV-2), una revisión	
From the genome to the proteins of the Acute Respiratory Syndrome Virus Severe-Coronavirus 2 (SARS-CoV-2), a review	62
<i>Michelle Santoyo Suárez, Jacziry Constante, Aylin Arce Hernandez, a Mayela del Angel Martínez , Gilberto Esquivel Muñoz, Jesus Morlett Chávez , Carlos Barrera Ramirez , Julio Martínez Gallegos</i>	
Hibridación en los procesos de soldadura: Una revisión	
Hybridization in Welding Processes: A Review	79
<i>Violeta Jasivy Campos-Hernández, Marco Arturo García-Rentería, Víctor Hugo López-Morelos</i>	
Aplicaciones Emergentes de Nanopartículas de ZnO en Procesos de Fotodegradación, Review.	
<i>Emerging Applications of ZnO Nanoparticles in Photodegradation Processes, Review.</i>	113
<i>Edson Edgardo Guipzot Sánchez, Víctor Hugo Martínez Landeros, Luis Alfonso García Cerda, Sergio García Villarreal, Marco Arturo García Rentería, Lázaro Abdiel Falcón Franco</i>	
Implicaciones ambientales y toxicológicas de los hidrocarburos aromáticos policíclicos: una revisión	
Environmental and toxicological implications of polycyclic aromatic hydrocarbons: a review	147
<i>Norma Araceli Guel-Najar, Aidé Sáenz-Galindo, Jorge Carlos Ríos-Hurtado</i>	
Revisión del aislamiento del cannabidiol mediante técnicas de encapsulación	
Review of isolation of cannabidiol using encapsulation techniques	179
<i>Erik De La Rosa-Montelongo, Lucero Rosales-Marines, Lorena Farías-Cepeda Juan Luis de la Peña-Zúñiga, Victor Manuel Ovando-Medina</i>	
Efectos de los diferentes parámetros y procesos sobre la resistencia al desgaste por deslizamiento de la familia Hastelloy.	
Effects of different parameters and processes on sliding wear resistance of the Hastelloy alloys.	193
<i>Ramón Alejandro López-Martínez, Lázaro Abdiel Falcon-Franco, Marco Arturo García-Rentería, José Lemus-Ruiz</i>	
Revisión general del desgaste en seco bola en superficie en aceros microaleados al nb sometidos a tratamiento térmico de solución.	
Review of assessment on ball on flat of wear on heat treatment microalloyed nb steel.	209
<i>Flores-Hernández David E., Soria-Aguilar M.J., García Guerra J.,Carrillo-Pedroza F. R.,León-Patiño C.A.</i>	
Cisticercosis hepática... ¿una enfermedad desafiante?	
Hepatic cysticercosis... a challenging disease?	226
<i>Mitzzy Guadalupe Hernández Durán, Israel Becerril Gómez, Marisol Neri Sánchez</i>	
El paradigma de la educación a distancia: Clases Digitales desde diferentes perspectivas. Transformaciones socioculturales en el marco de la cultura digital. Prácticas y actores educativos.	
<i>Current paradigm in virtual classes: Digital classes from different perspectives. Sociocultural transformations under the scope of digital culture. Educational actions and practices.</i>	242
<i>Jorge Sadi Durón</i>	

Caracterización quimioestratigráfica en el contacto de las formaciones Buda/Eagle Ford, sobre el Levantamiento Burro-Peyotes, en la carretera Nueva Rosita-Allende

Chemostratigraphic characterization at the contact of the Buda/Eagle Ford formations, on the Burro-Peyotes Uplift, on the Nueva Rosita-Allende highway

Jesús Antonio Blanco Moreno*, Roberto Díaz Martínez, Antonio Rodríguez Vega, Yuri Almaguer Carmenates, José Alberto Batista Rodríguez, Ramón Yosvanis Batista Cruz, Alejandra Guadalupe Gutiérrez Alejandro
Escuela Superior de Ingeniería Adolfo López Mateo. Boulevard Adolfo López Mateos S/N, Independencia, Nueva Rosita, Coahuila.

*Correspondencia: j-blanco@uadec.edu.mx

ORCID: 0000-0003-0558-9785

Categoría: Física, Matemáticas y Ciencias de la Tierra

Resumen

El límite entre las formaciones Buda e Eagle Ford, marcan en su contacto discordante el cambio de las series Comanche y del Golfo. Esta investigación centra sus objetivos principales en la localización y caracterización quimioestratigráfica de esta relación en un corte estratigráfico sobre el levantamiento Burro-Peyotes; a la par que permite ubicar y denunciar manifestaciones de hidrocarburos en su contacto y apoyar una correlación estratigráfica regional a partir de los datos geológicos y geofísicos. La firma espectral de rayos gamma en perfiles de carbonatos y margas aflorados en cortes de la Carretera 57, Nueva Rosita-Allende, sobre la estructura del Levantamiento Burro-Peyotes, se utilizó para reconocer la arquitectura estratigráfica en el contacto discordante entre las formaciones Buda e Eagle Ford. El conjunto de foraminíferos en el estudio permitió reconocer la transición del Cenomaniano al Turoniano marcada por la extinción de *Rotalipora cushmani* y la primera aparición de *Whiteinella archaeocretacea*. A su vez las relaciones de los elementos traza U/Th en conjunción con V/ (V + Ni) sugieren que las secuencias sedimentarias se depositaron en condiciones variables desde oxidantes a anóxicas; proceso que debió ser producto a los cambios de los ciclos cortos de los movimientos eustáticos durante el Cenomaniano-Turoniano. Se destaca para esta zona estudiada como un importante índice de prospección, la salida a superficie de hidrocarburos líquidos entre las grietas de las calizas de la Formación Buda, en el contacto discordante con la suprayacente Formación Eagle Ford.

Palabras clave: quimioestratigrafía, Buda, Eagle Ford, Cenomaniano, Turoniano, rayos gamma.

Abstract

The boundary between the Buda and Eagle Ford formations marks in their discordant contact the change of the Comanche and Gulf series. This research focuses its main objectives on the location and chemostratigraphic characterization of this relationship in a stratigraphic section on the Burro-Peyotes uplift; At the same time, it allows locating and reporting manifestations of hydrocarbons in their contact and supporting a regional stratigraphic correlation based on the geological and geophysical data obtained. The spectral signature of gamma rays in carbonate and marl profiles exposed in sections of Highway 57, Nueva Rosita-Allende, on the structure of the Burro-Peyotes Uplift, were used to recognize the stratigraphic architecture in the discordant contact between the Buda and Eagle Ford. The set of foraminifera in the study allowed us to recognize the transition from the Cenomanian to the Turonian marked by the extinction of *Rotalipora cushmani* and the first appearance of *Whiteinella archaeocretacea*. In turn, the relationships of the trace elements U/Th in conjunction with V/ (V + Ni) suggest that the sedimentary sequences were deposited under conditions varying from oxidative to anoxic; process that must have been a product of the changes in the short cycles of eustatic movements during the Cenomanian-Turonian. For this area studied, the release of liquid hydrocarbons to the surface between the cracks of the limestones of the Buda

Formation, in the discordant contact with the overlying Eagle Ford Formation, stands out as an important prospecting index.

Keywords: chemostratigraphy, Buda, Eagle Ford, Cenomanian, Turonian, gamma rays.

1. Introducción

Los registros estratigráficos son resultados de un sistema geológico; donde interactúan elementos y procesos geológicos, biológicos y tectónicos en un ambiente geoquímico dado; así influyen en sus resultados los cambios en el nivel del mar, las reacciones geoquímicas entre sedimentos y fluidos, las variaciones climáticas y los procesos de cambios diagenéticos y epigenéticos a lo largo del tiempo. La síntesis de los datos de cada uno de estos elementos y procesos permite obtener una comprensión integrada de las condiciones responsables de la distribución y el carácter de la secuencia sedimentaria (Sloss y col., 1949; Ramkumar, 1999; 2015).

El uso de la quimioestratigrafía como herramienta de estudio de las secuencias sedimentarias, es un proceso de caracterización geoquímica de un evento geológico específico, ocurrido en un entorno físico, químico y biológico único (Reineck y Singh, 1980) y repetible o no en el tiempo que genera unidades de depósitos con similitud en la firma geoquímica; lo que permite su distinción y correlación basada en la variación de los estratos en base a su signatura en el perfil geoquímico permitiendo relacionar cambio de composición del medio y los

sedimentos a través de límites cronoestratigráficos y/o lito-bioestratigráficos específicos (Ramkumar, 2015).

La correlación bioestratigráfica unida a la quimioestratigrafía (Craigie, 2018); y la firma espectral de rayos gamma en perfiles de carbonatos y margas permite reconocer superficies estratigráficas significativas (Ehrenberg y Svana, 2001), estos métodos, empleados en conjunción han aportado buenos resultados en las secuencias del límite de las Series Coahuila y del Golfo; permitiendo reconocer la arquitectura estratigráfica desarrolladas en las condiciones del corredor Cretácico del Golfo de México y el Mar Interior Occidental durante el Cretácico Superior (Lowery y col., 2014; Wehner y col., 2015; Wehner y col., 2017; Loucks y col., 2019; Valencia y col., 2021).

En la paleogeografía Cretácico superior se destacan las paleoplataformas carbonatadas Comanche y Coahuila (Figura 1); las cuales fueron inundadas progresivamente, a partir del Cenomaniano (Lehmann y col., 1999; Slattery y col., 2013; Denne et al 2014; Scott y col., 2016; Minisini y col., 2018; Blanco y col., 2021) (Figura 1). En este contexto, la Formación Eagle Ford de edad Cenomaniano-Turoniano, se depositó discordantemente sobre las secuencias del Cenomaniano inferior pertenecientes a la Formación Buda (Lowery y col., 2014; Ferrill y col., 2014; Valencia y col., 2021) sobre la paleoplataforma Comanche o sobre las secuencias de la Formación Aurora (Eguiluz de Antuñano, 1991) en la paleoplataforma de Coahuila. La identificación de la posición de esta discordancia según Eguiluz de Antuñano (1991), tiene importancia económica en la exploración de uranio y otros

minerales como la fluorita; y en el análisis de cuencas sedimentarias con fines de exploración de los sistemas petroleros.

La Formación Buda se reconoce como una acumulación de carbonatos constituida por caliza con estratos masivos, sin estructura interna aparente, de 10 a 20 cm de potencia, de colores crema blancuzcos a grises claros; sus estratos varían en su dureza y competencia e intemperiza a blanco, amarillo y anaranjado (Valencia y col., 2021), su ambiente de depósito es está considerado de plataforma poco profundo por encima de la base de las olas de la tormenta (Minisini y col., 2018).

Las secuencias intercaladas de caliza y lutitas de la Formación Eagle Ford han sido divididas en 5 facies; sostenidas en la fundamental por las variaciones de los valores de rayos gamma medidos en la sucesiones estudiadas, y las descripciones de los afloramientos continuos en la localidad de loa Los Azules, en el Ejido San Vicente Coahuila (Blanco y col., 2021) y Lozier Cañon en el Condado de Terrel, Texas (Donovan y col., 2015); así se reconocen las facies principales A, B, C, D y E de piso a techo de la Formación Eagle Ford (Facies A areniscas carbonatadas y calcarenitas, incluyen estratos finos de sedimentos de colores rojizos y abigarrados; Facies B lutitas calcáreas finas fisiles de color negro, con intercalaciones finas de areniscas calcáreas; Facies C alternancia no rítmica entre calizas arcillosas de color grisáceo y capas intercaladas de arcillas; Facies D margas y calizas de color amarillento a ocre, con nódulos de carbonatos y óxidos de hierro. y Facies E calizas amarillo ocre, intercaladas con lutitas calcáreas de color gris oscuro, intemperizadas con pátina de blanco a amarillento. (Donovan y col., 2012; Donovan y col., 2015,

Blanco y col., 2021). La generalización de los estudios de los cambios faciales ha permitido dividir las secuencias de la Formación Eagle Ford en dos miembros inferior y superior, basado en las diferenciaciones litológicas y sus variaciones quimioestratigráficas, donde se reconoce que la unidad inferior es rica en materia orgánica y mayor contenido de arcillas y la superior es más rica en carbonatos y menores valores de materia orgánica; El reconocimiento de esta relación es fundamental porque el miembro inferior rico en materia orgánica de la formación es el principal intervalo de generación de hidrocarburos en Eagle Ford. (Donovan y col., 2012; Blanco y col., 2021).

Al norte del estado de Coahuila, la Formación Eagle Ford registra en sus secuencias sedimentarias las condiciones quimio-ambientales del Mar Interior Occidental en su porción meridional, incluyendo el evento anóxico oceánico Bonarelli (Núñez-Useche y col., 2014, Blanco y col., 2021); esta formación es reconocida en afloramientos de localidades como San Vicente (Blanco y col., 2021), Piedras Negras, Levantamiento Burro Peyote, San Lucas, El Remolino, Rancho La Mota (Figura 1) (González-Betancourt y col., 2020; Enciso-Cárdenas y col., 2021) siempre en contacto discordante con la infrayacente Formación Buda, que marca el límite superior de la Serie Comanche (Valencia y col., 2021).

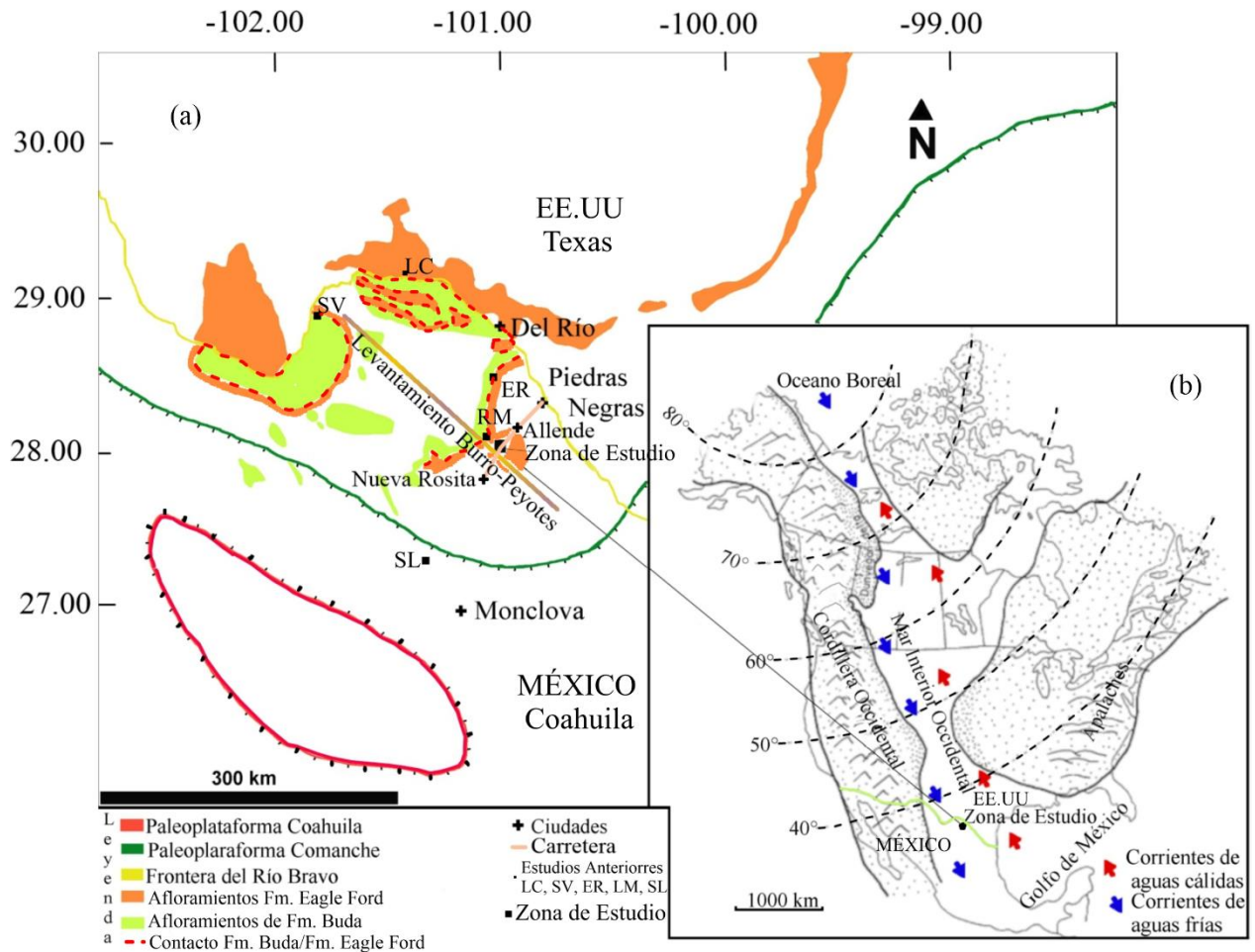


Figura 1. (a) Paleoplateformas Comanche y Coahuila Cretácico Superior Cenomaniano (modificado de Valencia y col., 2021; Blanco y col., 2021). (b) Extensión del Mar Interior Occidental, durante el Cenomaniano-Turoniano (Minisini y col., 2018). Estudios anteriores LC Lozier Cañón (Donovan y col., 2012); SV San Vicente (Blanco y col., 2021); El Remolino, LM Rancho La Mota (González-Betancourt y col., 2020); SL San Lucas (Enciso-Cárdenas y col., 2021).

Sobre la extensión del levantamiento Burro-Peyote (Figura 1); el mapa de anomalía aire libre, a partir de los datos gravimétricos satelitales (https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi, 2023). Se interpreta como una estructura antifórmica regional en el área de estudio (Figura 2, izquierda); así mismo a partir de los mapas perteneciente a la carta geológico-minera de Piedras Negras, H14-10 a escala 1:250,000 (Carrasco y col., 2002); unido al levantamiento geológico perteneciente a la carta geológica-minera de Nueva Rosita, G14-A13 a escala 1:50,000; y la información perteneciente a la carta resultado del trabajo de investigación sobre el modelo geológico estructural del Anticlinal Peyotes (Díaz, 1952), se muestra un esquema de los afloramientos de las formaciones Buda e Eagle Ford sobre el Anticlinal Peyotes (Figura 2, derecha). Los trabajos aseveran la existencia de los contactos entre estas formaciones Buda e Eagle Ford, sobre el levantamiento Burro-Peyote, también señalan la presencia de hidrocarburos solidificados dentro de grietas de la Formación Buda (Díaz, 1952); los trabajos de investigación, en el afloramientos de 10 metros de extensión en las coordenadas 100.9639 Oeste y 28.225 Norte (WGS 84 / UTM zona 14N), permite la ubicación confiables y caracterizan las relaciones entre las formaciones Buda e Eagle Ford; al documentar el contacto de sus relación estratigráfica, las variaciones quioestratigráficas y reportar la presencia de manifestaciones de hidrocarburos activas en el mismo; apoyando una correlación estratigrafía regional soportado en los datos geológicos y geofísicos obtenidos.

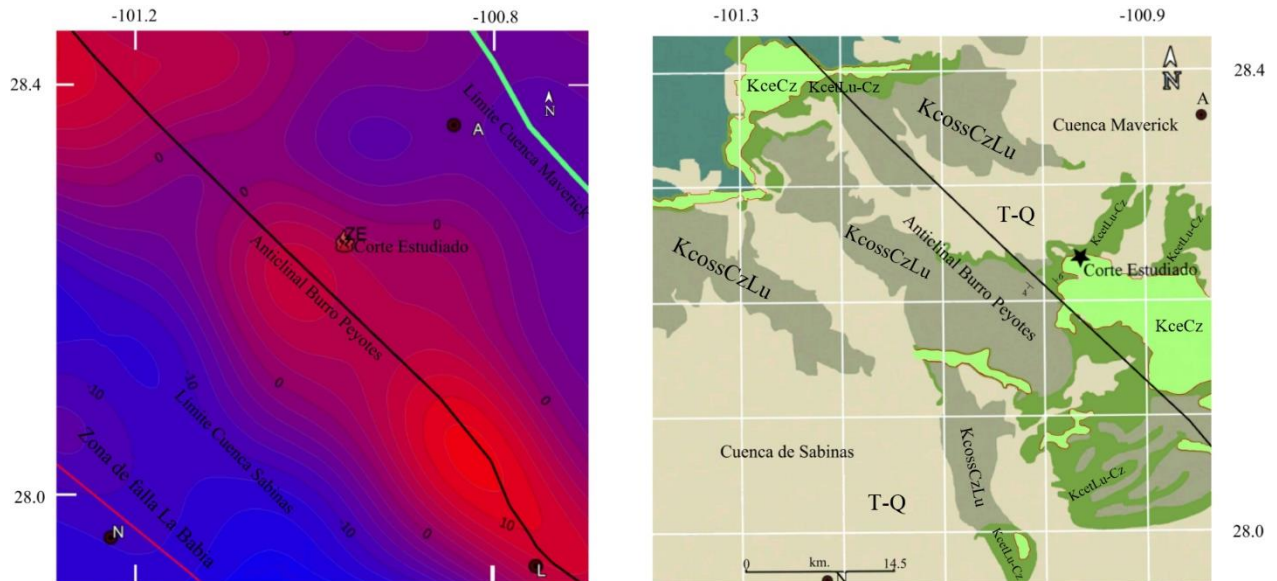


Figura 2. Modelo de mapa gravimétrico de aire libre sobre el levantamiento Burro-Peyotes; en el área de estudio (izquierda), máximos en tonos de rojo y mínimos tonos de azul (datos tomados de https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi, 2023). Esquema geológico simplificado de la zona de estudio. Formaciones Buda KceCz; Eagle Ford KcetLu-Cz; Austin KcrossCz-Lu; sedimentos Terciario-Cuaternario T-Q; modificado de Díaz (1952); Carrasco y col., (2002). N Nueva Rosita, L Lomerio de Peyotes, A Allende, ZE Corte Estudiado.

2. Contexto geológico regional.

2.1 Tectónica y sedimentación.

El noreste de México, geológicamente, está ligado a la evolución tectonoestratigráfica compleja del Golfo de México (Stern y Dickinson, 2010; Davison y col., 2022), y su conexión con el Mar Interior Occidental (Slattery y col., 2013; Minisini y col., 2018).

La tectónica regional en el noreste de México (Figura 3), presenta alineaciones con dirección principal NW-SE heredadas de la apertura del Golfo de México, como la Falla San Marcos, La Babia, (Chávez-Cabello y col., 2005; Pindell y col., 2020) (Figura 3a); modificadas desde fines del Cretácico al terciario por la Orogenia Mexicana (Davison y col., 2022); el acortamiento produjo pliegues contraccionales, fallas inversas y el desarrollo de fallas de deslizamiento por el rumbo de dirección NE-SW; que desplazaron y modificaron el plegamiento de dirección general NW-SE (Chávez-Cabello y col., 2005) (Figura 3b). Las anomalías gravimétricas positivas más prominentes en la confluencia de los estados de Texas y Coahuila están representadas por el levantamiento Burro – Peyotes (Figura 3), que constituye límite entre la Cuenca de Sabinas, Burgos y Maverick (Figura 3). La zona de estudio ubicada en el alto gravimétrico Burro-Peyotes, está desplazado por estructuras rumbo deslizantes con direcciones preferenciales NE-SW (Figura 3) controladas por la zona de Fallas La Babia con dirección NW-SE.

Durante el Cretácico Tardío las relaciones tectono-eustáticos fueron los principales controladores de la sedimentación en el mar interior occidental (Slattery y col., 2013) (Figura 1), expresada por ciclos transgresivos-regresivos que provocaron la migración de las líneas de costa (Jones y col., 2018).

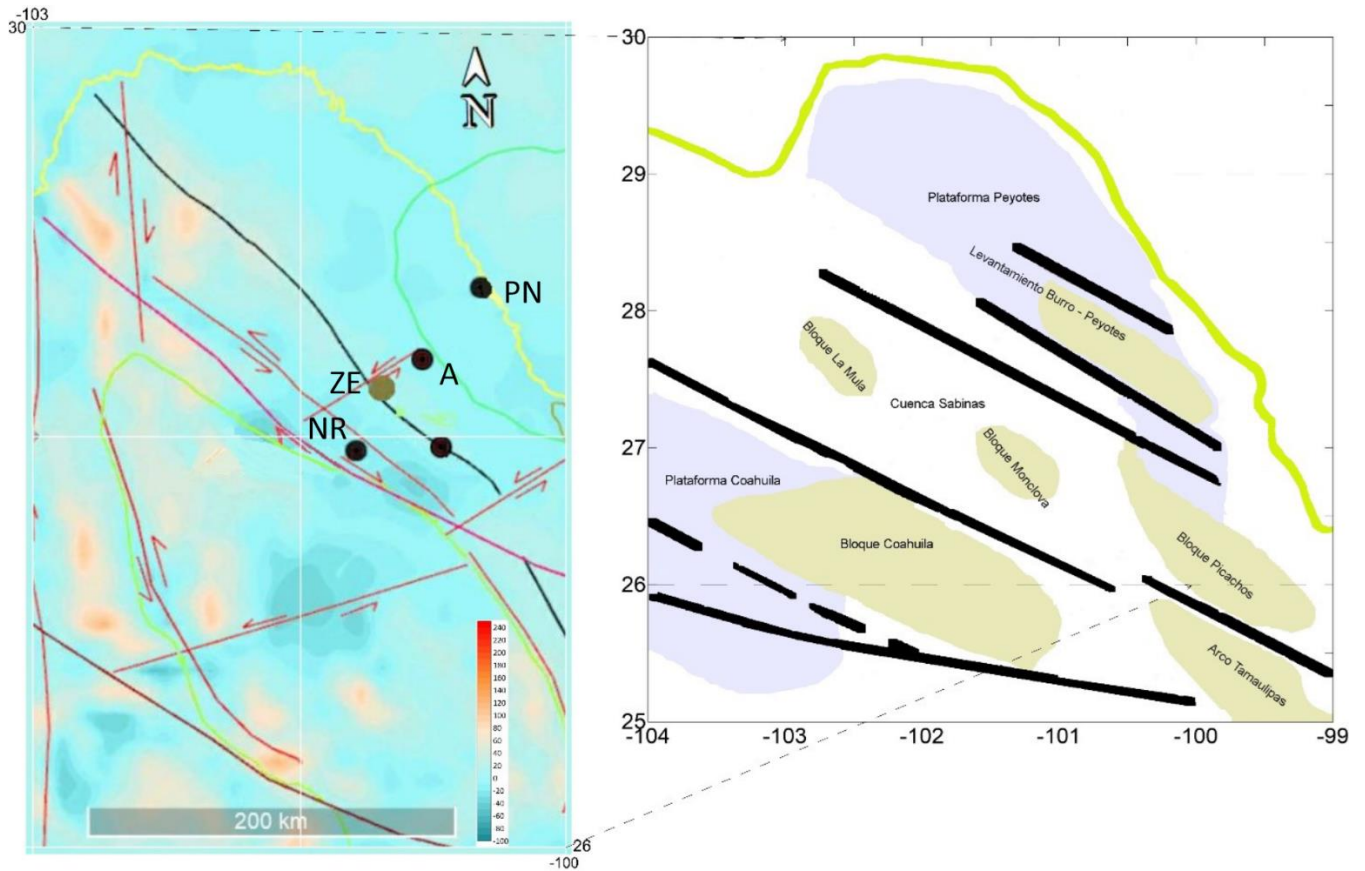


Figura 3. (a) Esquema tectónico regional (modificado de Pindell y col., 2020). (b) Principales fallas rumbo deslizantes, controladas por las Zonas de Fallas La Babia al norte y San Marcos al Sur; el rumbo NW-SE es la dirección principal de estas estructuras (modificado de Chávez-Cabello et al, 2005).; la alineación de las fallas sobre la estructura Burro-Peyotes tienen dirección principal NE-SW, en la zona de estudio (ZE). Datos gravimétricos tomados de Sandwell y col., (2014). Límites de

las Cuencas de Sabinas y Burgos; CNH, (2018). PN Piedras Negras, A Allende, NR Nueva Rositas, L Lomeríos de Peyotes.

El registro sedimentario durante el Cenomaniano medio-Turoniano inferior es coincidente con la confluencia de las aguas frías del Océano Boreal y las aguas cálidas provenientes del Mar de Thetys (Figura 1) (Lowery, y col., 2014) característica medioambiental que permitieron zonas de abundante proliferación de la vida, con una alta tasa de sedimentación de materia orgánica reconocido en los altos valores de contenido orgánico total en la Formación Eagle Ford en el área de estudio (González-Betancourt y col., 2020); coincidente con una transgresión marina a nivel global, causante de la acumulación de formaciones arcillosas ricas en materia orgánica en otras zonas del mundo (Liro y col., 1994; Dawson, 2000). En la zona de estudio se produce la inundación progresiva de las plataformas Comanche y Coahuila a partir del Cenomaniano inferior (Figura 1), depositándose la Serie del Golfo en discordancia regional sobre estas (Valencia y col., 2021).

3. Materiales y Métodos.

El estudio inició con trabajos de campo. La sección expuesta fue medida y descrita en un afloramiento en un corte de carretera Nueva Rosita-Allende, sobre la estructura del Levantamiento Burro-Peyotes (Figura 4). Las estructuras sedimentarias fueron descritas utilizando la clasificación de Campbell (1967). En los análisis petrográficos bajo microscopio de secciones delgadas se utilizó la clasificación según Dunham (1962).

Las determinaciones paleontológicas se realizaron en secciones delgadas bajo un microscopio de luz transmitida sobre dos muestras (SP 1 y SP 2) (Figura 4), las mismas ubicadas en la porción inferior y superior respectivamente del contacto observado entre las secuencias. Los bioeventos de foraminíferos planctónicos y bentónicos se tomaron de la Carta Bioestratigráfica - Cuenca del Golfo (Lu y col., 2019).

Los datos de espectrometría de rayos gamma (SGR) fueron obtenidos con un equipo RS-125 SUPER SPEC. La medición sobre el afloramiento de los valores espectrales de potasio, equivalentes de uranio y torio (K %, eTh ppm y eU ppm), se realizó con una distancia aproximado de 0.15 m en la vertical, alternando con 0.25 m en la horizontal en todo el corte, para eliminar en gran medida la superposición de los datos adquiridos, dado el pequeño espesor de las capas y las variaciones litológicas (Figura 4), el tiempo de adquisición de datos fue de 180 segundos. A partir de los valores obtenidos, se calculó el *Gamma Ray* (GR) obtenido de acuerdo con la fórmula de Ellis, $GR=(16*K) +(8*U) +(4*Th)$ (Herron y Herron, 1996), expresado en grados API (GR, API^o); lo que permitió caracterizar los cambios faciales verticales.

Las concentraciones de los valores de los elementos químicos mayores y menores se midieron sobre 13 muestras de mano que describen el corte investigado y fueron tomadas en posiciones muy cercanas a los puntos de medición de los valores espectrales (Figura 4), las mismas fueron cortadas y molidas a hasta 200 micras lo que minimizó los efectos de matriz, especialmente con rocas sedimentarias de

grano fino (Gabriel y col., 2022); para ello se utilizó un equipo portátil de Fluorescencia de Rayos X (ED-FRX) Olympus Delta Professional DPO-2000, el cual cuenta con un tubo de Rh de 40 kV de potencia y un detector de deriva de silicio. Los resultados geoquímicos medidos con los equipos de mano son óptimos para el análisis de quimiofacies, y su precisión permite la caracterización quimioestratigráfica de las secuencias y su ambiente de depositación (Rowe y col., 2012) tomando en cuenta las relaciones de las distribuciones de Th/K y Th/U (Jones y Manning, 1994; Kouamelan y col., 2020).

Los datos geoquímicos obtenidos son descritos a continuación, para caracterizar la arquitectura litoestratigráfica a partir de los patrones de variabilidad Gamma Espectral y geoquímicos en la base de la Formación Eagle Ford y el contacto con la Formación Buda, que la subyace, ubicado a partir de determinaciones paleontológicas; permitiendo la correlación estratigrafía regional soportado en los datos geológicos y geofísicos obtenidos; lo que permite cumplir objetivos relacionados con la localización y estudio del límite entre las formaciones Buda e Eagle Ford, en un perfil de carretera Nueva Rosita-Allende.



Figura 4. Puntos de medición de los valores espectrales de K %, eTh ppm y eU ppm, se realizó con un paso aproximado de 0.15 m en la vertical, alternando con 0.25 m en la horizontal en todo el corte. Las determinaciones paleontológicas se realizaron en secciones pulidas sobre dos muestras SP1 y SP2, a ambos lados de la línea de contacto (rojo discontinuo). La pica de geólogo sirve como escala.

4. Resultados.

4.1 Descripción de los afloramientos

El perfil investigado está ubicado en la coordenada 100.9639 Oeste y 28.225 Norte (WGS 84 / UTM zona 14N), Figura 2; con una potencia aflorante de unos tres metros aproximados, donde se observa una relación discordante brusca entre capas de calizas con un espesor variable y cercano a los 10 cm, de color gris muy duras con fractura concoidea, separadas en discordancia ondulatoria de capas de menos de 1 cm de espesor de secuencias alternadas de lutitas, areniscas calcáreas, margas deleznable y calizas Figura 5 (c, d, e).

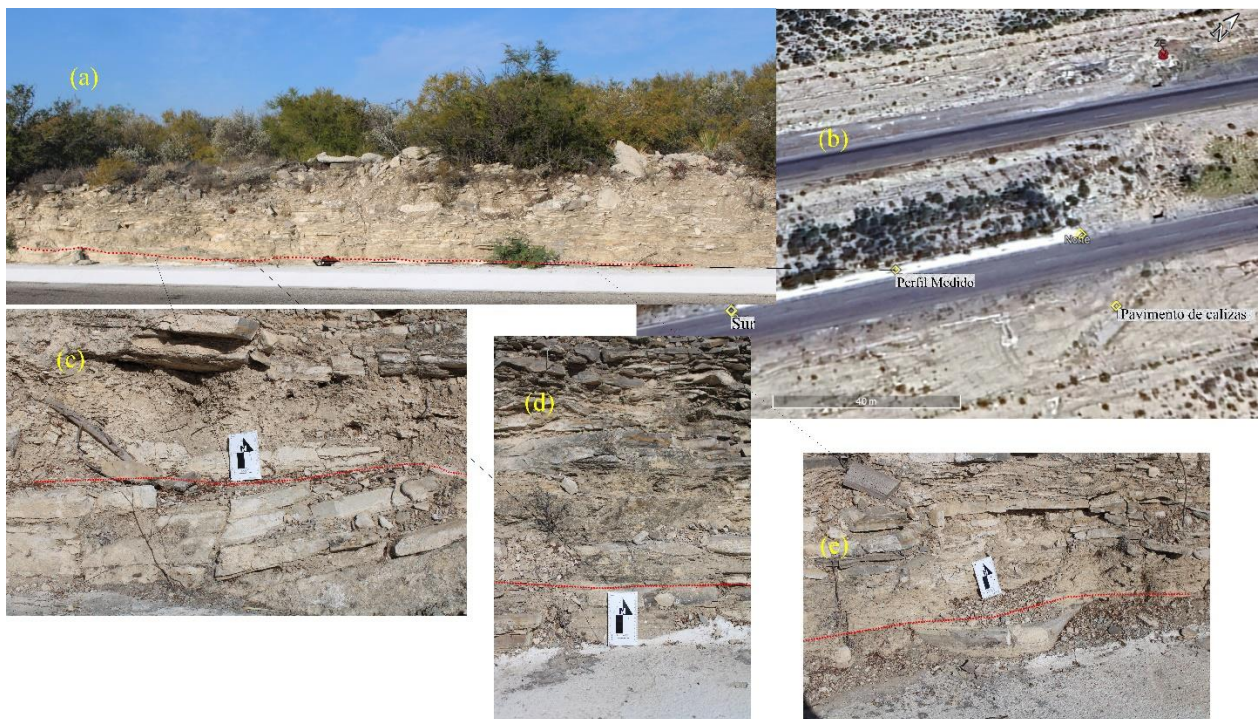


Figura 5. (b). Puntos de estudio en la carretera, sobre el levantamiento Burro-Peyote; (a) Contacto discordante (línea roja) entre las calizas con un espesor aproximado de 10 cm, de color gris muy duras con fractura concoidea; separadas discordantemente de capas de menos de 1 cm de espesor de material fino lutítico carbonatado deleznable; ampliación en las fotos (c, d, e) contacto entre las calizas y lutitas.

Resalta hacia la parte superior del contacto la alternancia de estratos de areniscas calcáreas y lutitas de colores oscuros, con estructura ondulada, y estratificación cruzada (*hummocky* (HCS) y *swaley* (SCS) Figura 6; a la par que destacan una amalgama de estructuras de estratos en formas de lajas de hasta 5 centímetros de espesor (*flaggy-bedded*) Figura 6 por la letra A.



Figura 6. Capas con eestructuras de estratificación cruzada (*hummocky* (HCS) y *swaley* (SCS)). (A) Capas en formas de lajas de hasta 5 centímetros de espesor (*flaggy-bedded*).

En dirección noreste del punto, a una distancia aproximada de 60 metros, aflora un pavimento de calizasaporcelanadas duras de colores grises a blanquecinos; con estratificación masivas, mostrando fractura concoidea, agrietamiento en mosaico, y salida activa de petróleo a la superficie entre las grietas (Figura 7 A, B, C y D), estas rocas manifiestan débil grado de disolución con incipientes marcas de carstificación.



Figura 7. Ubicación (A) del pavimento de calizas aporcelanadas duras de colores grises a blanquecinos (B), mostrando fractura concoidea, agrietamiento en mosaico (C), y salida activa de petróleo a la superficie entre las grietas (D).

4.2 Petrografía.

El análisis petrográfico de la muestra (SP 1), muestra una proporción de entre 10 a 30% de microfósiles calcáreos en una matriz micrítica, esta se clasifica como un wackestone. Los microfósiles foraminíferos bentónicos del género *Ammobaculites* y *Dentalina*; así como los foraminíferos plantónicos *Favusella washitensis*, (Carsey, 1926), *Thalmaninella gandolfii* (Luterbacher y Premoli Silva, 1962), *Planoheterohelix moremani* (Cushman, 1938) (Figura 8).

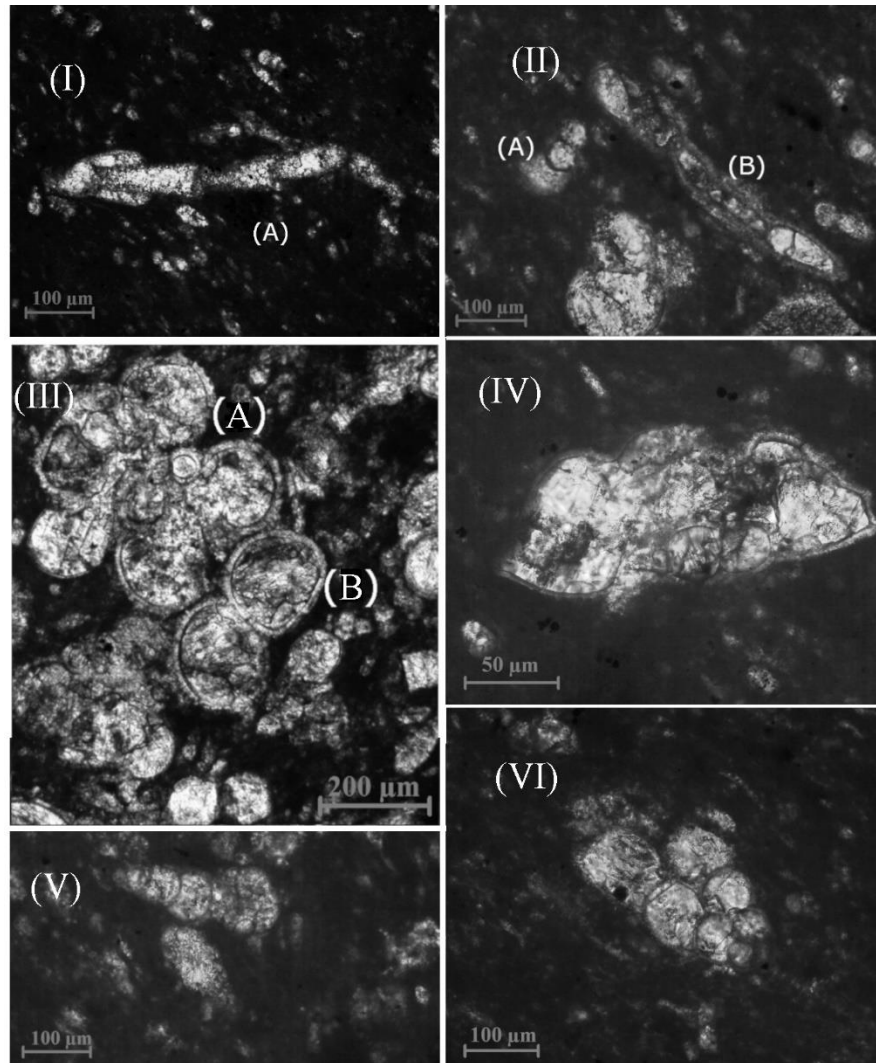


Figura 8. Microfotografías en tono de grises, mostrando los foraminíferos dentro de matriz micrítica fondo negro. Foraminíferos bentónicos (I) (A) *Ammobaculites* sp; (II) (A) *Textularia* sp. (B) *Dentalina* sp; (III) (a) *Favusella washitensis*, (b) *Favusella* sp.; (IV) *Thalmaninella gandolfii*; V y VI *Heterohelix cf. moremani*. Ubicación de la muestra SP1, Figura 4, (A)

A partir de la descripción y análisis de secciones delgadas de las muestras de rocas SP 2, se identifica un conjunto de microfósiles embebidos en una matriz micrítica, por lo cual se clasifica como la roca contenedora como un wackestone-packstone, Figura 9. Esta roca, presenta un conjunto de foraminíferos planctónicos tales como *Whiteinella archaeocretacea* (Pessagno, 1967), *Globigerinelloides bollii* (Pessagno 1967), *Praeglobotruncana gibba* (Postuma, 1971); *Rotalipora cushmani* (Morrow, 1934), *Planoheterohelix globulosa* (Pessagno, 1967), prismas de *Inoceramus sp*, así como es notable la ausencia de foraminíferos bentónicos (Figura 9).

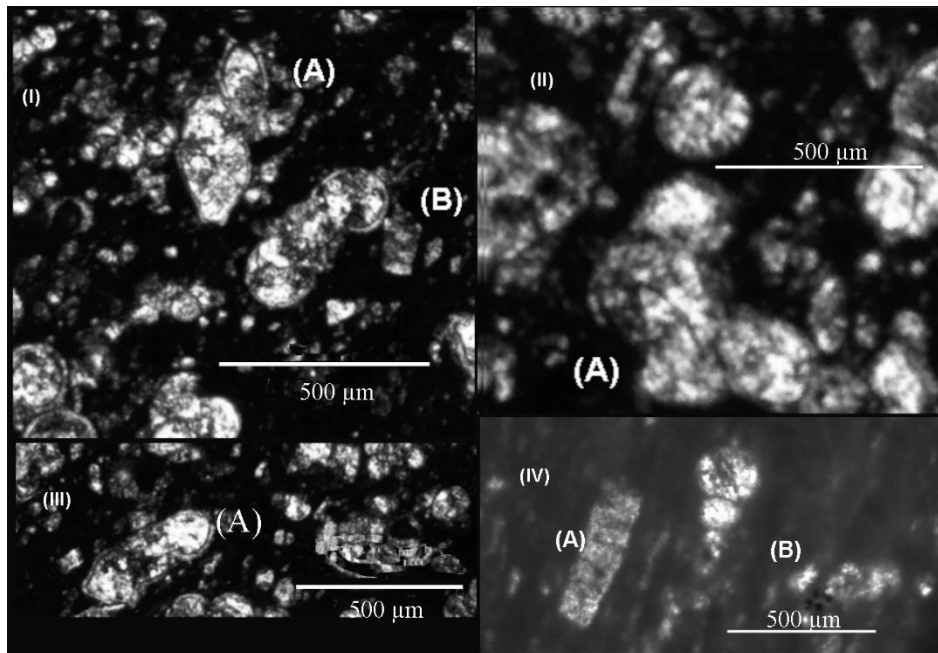


Figura 9. Microfotografías en grises mostrando los foraminíferos dentro de matriz micrítica fondo negro. (I) (A) *Whiteinella archaeocretacea* (B) *Globigerinelloides bollii*; (II) (A) *Praeglobotruncana gibba*; (III) *Rotalipora cushami*. (IV) (A) prismas de

Inoceramus (B) *Planoheterohelix globulosa*. Ubicación de la muestra SP2, Figura 4,
(B)

Por otra parte, unos 30 cm arriba de la posición de la muestra SP2 del corte estudiado, se describe un conjunto de macrofósiles bénticos, está representado principalmente por un lecho de conchas sueltas algunas imbricadas de bivalvos *Inoceramus* sp, que aparecen en conjunto con icnofósiles de *Thalasinoides/Ophiomorpha* de unos 20 cm de largo y 10 mm de diámetro, con forma ramificada en forma de Y, en una arenisca bioturbada (Figura 10).



Figura 10. Macrofósiles, representado por *Inoceramus* sp (A) y en conjunción con icnofósiles *Thalasinoides/Ophiomorpha* (B), en una arenisca bioturbada.

4.3 Perfiles rayos gamma.

La generalización de los valores geoquímicos medidos en el corte estudiado se muestra en las tablas a continuación; en la Tabla 1. Se resumen las mediciones de espectrometría de rayos gamma de K%, Uppm y Thppm. En el afloramiento estudiado las mediciones espectrales de eU, eTh y K (Tabla 1), se manifiesta un aumento brusco de los valores de los contenidos de U, Th y K hacia la parte alta de la secuencia medida y relacionado con el cambio litológico brusco de capas de wackestones, a grainstones intercalados con lutitas carbonatadas (color amarillo). En las capas contenedoras de lutitas y bentonitas los valores de K, Th y U se muestran más elevados (color azul).

Tabla 1. Valores K (%), eU (ppm) y eTh (ppm), medidos en el afloramiento y GR (API) calculados a partir de la fórmula de Ellis (Herron y Herron, 1996).

Muestra	Altura	K(%)	eU(ppm)	eTh(ppm)	GR (API)
M15	2.1	0.3	1.6	2.9	29.2
M14	1.95	0.1	2.6	2.6	32.8
M13	1.8	0.3	2.4	2.9	35.6
M12	1.65	0.1	2.7	2.1	31.6
M11	1.5	0.2	2.8	2.8	36.8
M10	1.35	0.3	2.4	3.1	36.4
M9	1.2	0.4	4.7	4.2	60.8
M8	1.05	0.4	4.1	2.5	49.2
M7	0.9	0.6	3.6	2.6	48.8
M6	0.75	0.3	2.3	4.8	42.4
M5	0.6	0.3	2.3	3.9	38.8
M4	0.45	0.3	0.9	1.5	20.8
M3	0.3	0.2	1.6	1.2	20.8
M2	0.15	0.3	0.6	1.8	16.8
M1	0	0.1	1.6	1.4	20

Min	0.1	0.6	1.2	16.8
Max	0.6	4.7	4.8	60.8
DVS	0.12754	1.0750917	0.99857676	11.9467262

4.4 Perfil geoquímico.

Las tablas 2 y 3, muestran los elementos mayores en porcentaje, LE% (elementos ligeros), Ca%, Si%, Al%, Fe% y K% obtenidos por fluorescencia de rayos x; y la Tabla 3 elementos menores Sr, V, Mn, Zn, Ni, Mo todos en ppm resultantes de las mismas mediciones, respectivamente.

En la Tabla 2, los valores de los elementos mayores medidos, sobre el afloramiento estudiado en la Carretera Nueva-Rosita-Allende (izquierda); tomando en cuenta los elementos ligeros (LE) permite reconocer la valides de las mediciones con un error estándar de 0.007 y 0.14 respectivamente. La secuencia presenta valores medios de Ca 40.1% para la parte baja y de 37.29% para la sección superior, así como valores de Si de 3.82% y 8.07% respectivamente, el Al varia de 0.74% a 2.0% de abajo a arriba.

Tabla 2. Valores de los elementos mayores y su conversión a óxidos, medidos en la parte inferior y superior del contacto sobre el afloramiento de la Carretera

Nueva-Rosita-Allende.

Muestra	Óxidos mayores (%)				Elementos mayores (%)					
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	LE%	Ca%	S%	Al%	Fe%	Total %
13	48.98	11.16	4.25	1.24	55.64	35.01	5.22	2.25	0.97	99.09
12	56.09	13.88	1.6	0.18	51.35	40.9	6.49	0.85	0.14	99.73
11	52.76	18.05	2.51	0.24	51.72	37.71	8.44	1.33	0.19	99.39
10	59.77	8.129	2.15	0.21	51.95	42.72	3.8	1.14	0.17	99.78
9	35.51	42.87	10.18	1.54	45.15	25.38	20.04	5.39	1.20	97.16
8	41.89	36.51	7.63	1.01	47.08	29.94	17.07	4.04	0.79	98.92
7	62.47	9.17	2.41	0.33	49.02	44.65	4.29	1.28	0.26	99.50
6	52.17	17.26	4.81	0.42	50.75	37.29	8.07	2.55	0.33	98.99
5	42.82	33.05	5.49	0.69	49.84	30.61	15.45	2.91	0.54	99.35
4	32.69	22.95	3.94	0.59	62.46	23.37	10.73	2.09	0.46	99.11
3	50.31	22.39	4.3	0.78	50.12	35.96	10.47	2.28	0.61	99.44
2	62.24	8.364	2.39	0.54	49.53	44.49	3.91	1.27	0.42	99.62
1	59.08	6.18	0.88	0.19	54.01	42.23	2.89	0.47	0.15	99.75
Min	32.69	6.18	0.88	0.18	45.15	23.37	2.89	0.47	0.14	97.16
Max	62.47	42.87	10.18	1.54	62.46	44.65	20.04	5.39	1.20	99.78
DVS	9.434607	11.3818	2.49054	0.41464	4.10336	6.78311	5.3204	1.32	0.32	0.66
Min	50.31	6.18	0.88	0.19	49.53	35.96	2.89	0.47	0.15	99.44
Max	62.24	22.39	4.3	0.78	54.01	44.49	10.47	2.28	0.61	99.75
DVS	5.046708	7.18225	1.39939	0.24226	1.98748	3.60835	3.3587	0.74	0.19	0.13
Min	32.69	22.39	3.94	0.59	50.12	23.37	10.47	2.09	0.46	99.11
Max	62.47	42.87	10.18	1.54	62.46	44.65	20.04	5.39	1.20	99.78
DVS	21.70616	16.2095	4.05807	0.59359	24.4721	15.4986	7.577	2.15	0.46	46.12

Los valores de CaO disminuyen bruscamente a partir del contacto, color amarillo parte baja y azul parte alta del corte; el SiO₂ aumenta hacia la parte alta del contacto al igual que los valores de Al₂O₃ y Fe₂O₃.

Los elementos químicos trazas medidos en la sección en estudio se muestran en ppm en la Tabla 3. La tendencia general es a ascender desde la parte inferior a la superior del corte.

Tabla 3. Valores de los elementos trazas en el corte estudiado, valores en ppm.

Muestras	Elementos (ppm)					
	Sr	V	Mn	Zn	Ni	Mo
13	887	440	100	98	70	7
12	1184	353	134	47	24	6
11	843	915	200	47	43	8
10	573	232	135	40	28	10
9	1024	1249	88	142	63	16
8	952	701	1568	201	220	8
7	639	362	166	54	35	4
6	1172	548	151	83	43	14
5	908	510	485	122	76	12
4	859	609	128	127	62	28
3	1515	417	69	105	44	15
2	613	311	136	72	29	6
1	463	214	149	55	37	12
Min	463	214	69	40	24	4
Max	1515	1249	1568	201	220	28
DVS	278	280	388	45	49	6
Min	463	214	69	55	29	6
Max	1515	417	149	105	44	15
DVS	465	82.9	35.1	21	6.1	4
Min	573	232	88	40	24	4
Max	1184	1249	1568	201	220	28
DVS	188	286	431	50	54	7

5. Discusión.

5.1 Delimitación de las unidades en contacto

Los resultados paleontológicos de las muestras SP1 (Cenomaniano Inferior) y SP2 (Cenomaniano parte alta al Turoniano) unido a la presencia de macrobéntonicos

(*Inoceramus* sp.) definen el contacto entre las formaciones Buda e Eagle Ford en la zona de *Rotalipora Cushmani*, a la vez que permiten reconocer el cambio de la Serie Coahuila a la Serie del Golfo. Este contacto esta también signado por los cambios bruscos en el perfil GR calculado, producido por el aumento de los contenidos de uranio y torio (Figura 10 y 11); ambos resultados concuerdan con investigaciones dentro de algunos afloramientos estudiados en el Parque Nacional del Big Bend en la localidad de Lozier Cañón, en el estado de Texas (Wehner y col., 2017; Minisini y col., 2018) y en la zona del Ejido San Vicente, Coahuila (Blanco y col., 2021); a la par los cambios bruscos en los valores de GR ente las formaciones estudiadas, son manifiestos en el subsuelo de las cuencas de Sabinas y Maverick (Driskill y col., 2012; CNH, 2018a)

Quimioestratigrafía.

En el afloramiento estudiado las mediciones espectrales de U, Th y K (Tabla 1), se manifiesta un aumento brusco de los valores de los contenidos de U, Th y K hacia la parte alta de la secuencia medida y relacionado con el cambio litológico brusco de capas de wackestone de la Formación Buda, a grainstones intercalados con lutitas carbonatadas típico de la Formación Eagle Ford (Wehner y col., 2017; Minisini y col., 2018; Blanco y col., 2021).

Los registros de los espectros de rayos gamma muestran información sobre la variación litoestratigráfica en los perfiles medidos; asociando, los altos valores de K al enriquecimiento en sedimentos siliciclásticos, Th a las capas con bentonita

resultantes de actividad volcánica y el U a la presencia de altos valores de materia orgánica (Gardner y col., 2012). En el perfil estudiado los valores de K, Th y U van en aumento desde la parte inferior del corte, mejor apreciado en los valores calculados de GR (API), a partir de la fórmula de Ellis (Herron y Herron, 1996); definiendo un cambio desde un ambiente sedimentario mayormente carbonatada a secuencias con mayor presencia de material siliciclástico (Figura 10a).

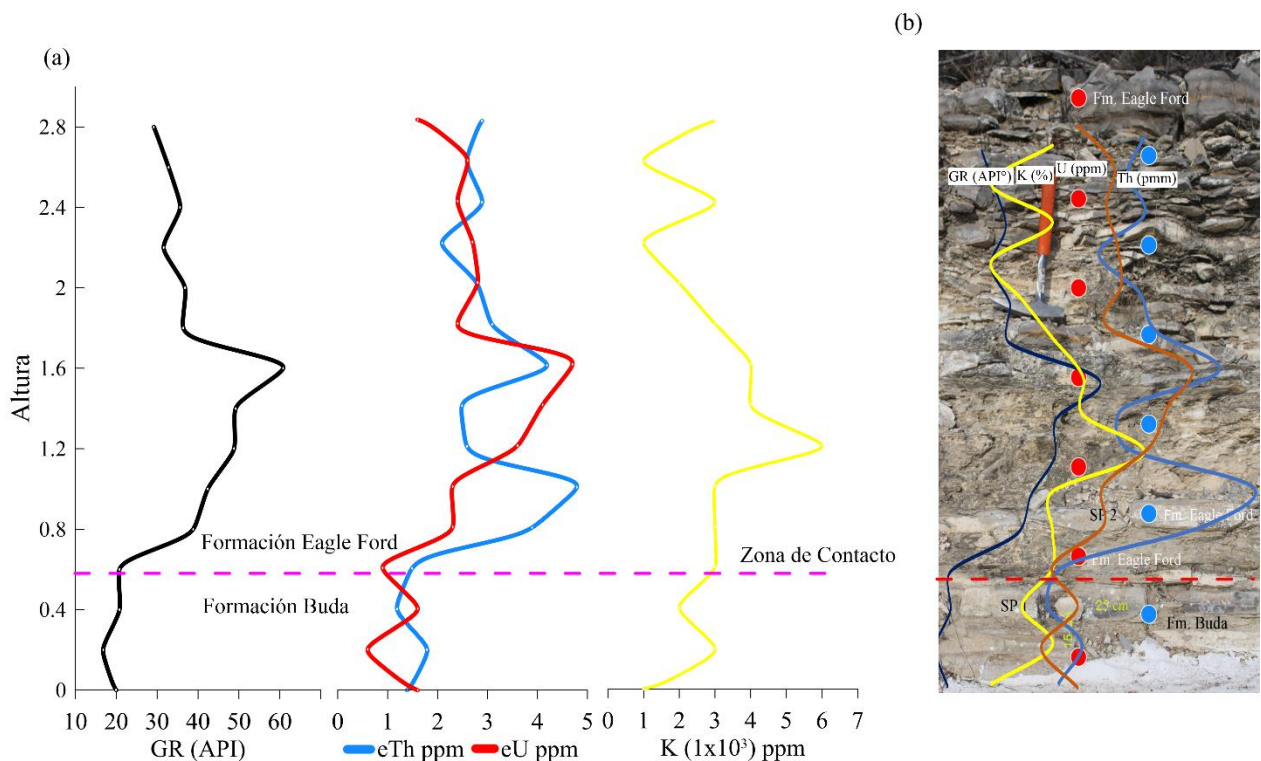


Figura 10. (a) Curva de los valores espectrales de Th (ppm), U (ppm) y K (1×10^3 ppm) contra altura del afloramiento; (b) superposición de las curvas calculadas

sobre el afloramiento, nótese el cambio brusco sobre el contacto entre las formaciones Buda e Eagle Ford.

En la Figura 10b, se resalta la distribución de los valores espectrales de U, Th y K a partir del contacto entre las formaciones. La porción inferior correspondiente a la Formación Buda, desde 0 y 0.45 m, muestra bajos valores de Th (1.4 ppm), U (1.1 ppm) y K de 0.2% (2×10^3 ppm) medidos con el equipo manual de SGR; ; por otra parte, la porción inferior de la Formación Eagle Ford, que la está sobreyaciendo, tiene valores más elevados de Th con un promedio de 3.12 ppm, U promedio de 2.86 ppm, y K promedio de 0.3 % (3×10^3 ppm) En resumen, en la sección medida, los valores de K, Th y U son más bajos dentro de las unidades carbonatadas de la Formación Buda, conteniendo foraminíferos planctónicos y bentónicos de la zona nerítica, en sus aguas someras submareales, y más elevados en las arcillas con bentonitas de la Formación Eagle Ford sin especies bentónicas de foraminíferos afectadas por la inundación de la plataforma (Lowery y col., 2014) y la presencia de *Rotalipora cushami*, discerniendo el contacto abrupto entre ambas formaciones estudiadas. El contacto, aunque abrupto en la zona estudiada parece ser concordante con rasgos de paraconformidad (Figura 5).

Los valores de los elementos mayores medidos en la parte superior de la Formación Buda e inferior de la Formación Eagle Ford (Tabla 2), que aflora en el sitio de estudio, sobre el afloramiento de la Carretera Nueva Rosita-Allende; indican una secuencia mayormente carbonatada con valores medios de CaO 57.21% para la

Formación Buda (B) y de 42.56% para la Formación Eagle Ford (E), así como SiO_2 12.31% (B) y 24.42% (E), los valores de Al_2O_3 2.52% (B) y 4.74% (E); como puede apreciarse, en la zona de contacto los valores de CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , indicando un brusco cambio en el ambiente de depositación, posiblemente ligado a la inundación de la plataforma (Wehner y col., 2017) y a la llegada de material sedimentario siliciclástico indicado en el aumento de los valores de Si y Al y la disminución de los contenidos de Ca, tomados como proxies de las variaciones de los contenidos de calcita, arcillas (Figura 11); característica reportada en otras regiones estudiadas tales como Lozier Cañón y los núcleos del Pozo Iona-1 (Wehner y col., 2017; Eldrett y col., 2017), cuyos valores reportan valores de calcita mayores a 45% para la Formación Buda y una disminución brusca a valores cercanos 30% en la Formación Eagle Ford.

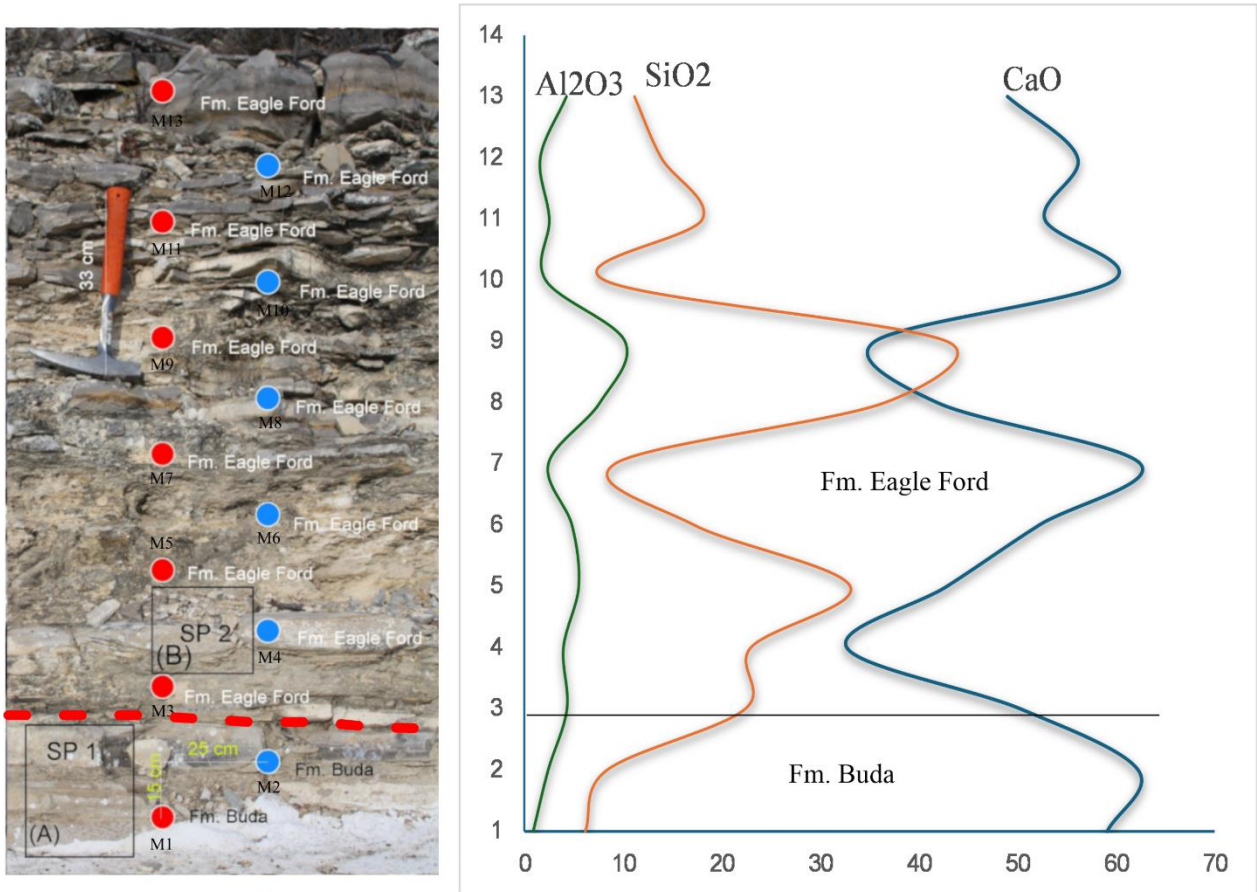


Figura 11. Distribución de los valores de CaO, SiO₂, Al₂O₃ en la zona de contacto (línea roja en la foto; línea negra en el gráfico), indicando un cambio brusco en el ambiente de depositación, posiblemente ligado a la inundación de la plataforma. (los valores de CaO, SiO₂ y Al₂O₃ están en %, los números en la columna Y, representan las muestras)

Las relaciones de los contenidos de los elementos químicos mayores SiO₂, Al₂O₃ y CaO se muestran en la figura (Figura 12), y permite la caracterización

quimioestratigráfica de la secuencia estudiada, pues reflejan las mezclas de los sedimentos terrígenos representados en lo fundamental por los contenidos del Al_2O_3 y SiO_2 para arcillas, cuarzo o sílice biogénica, y carbonatos a partir de los contenidos de CaO (Atar y col., 2019)

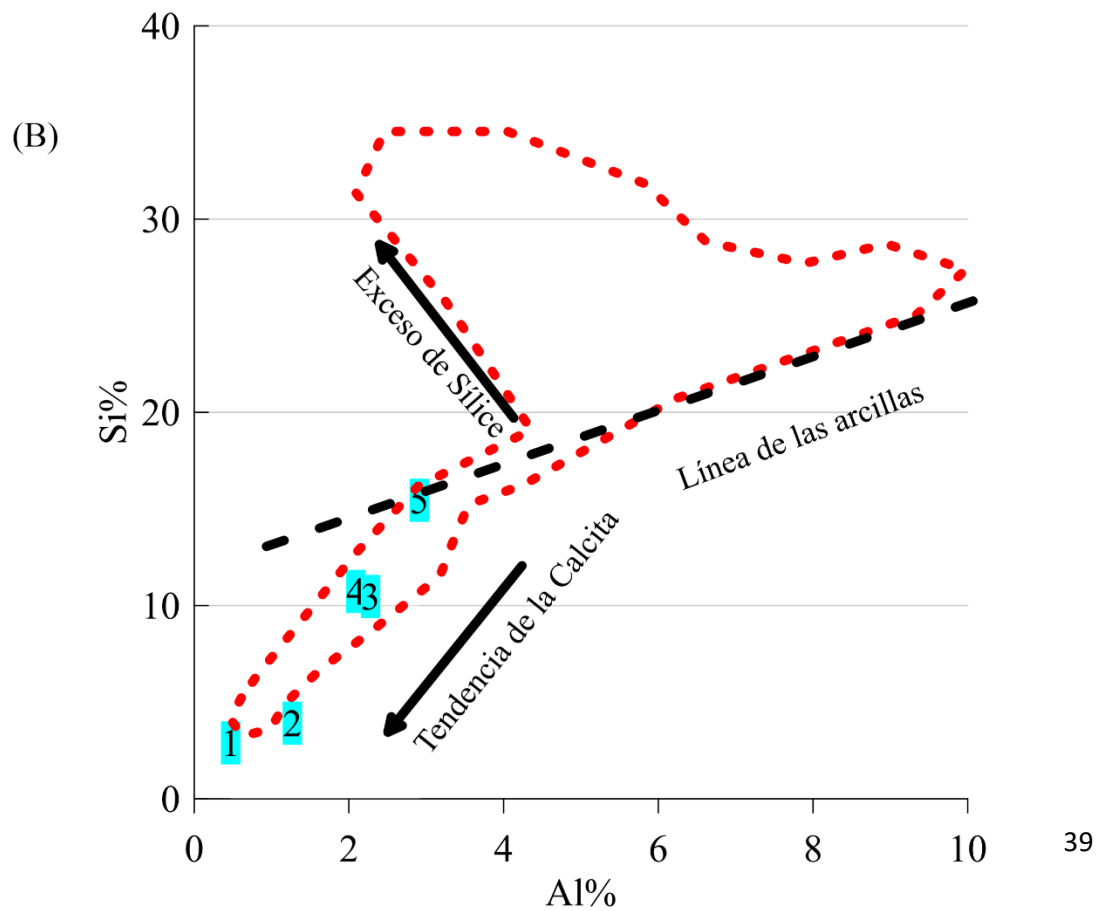
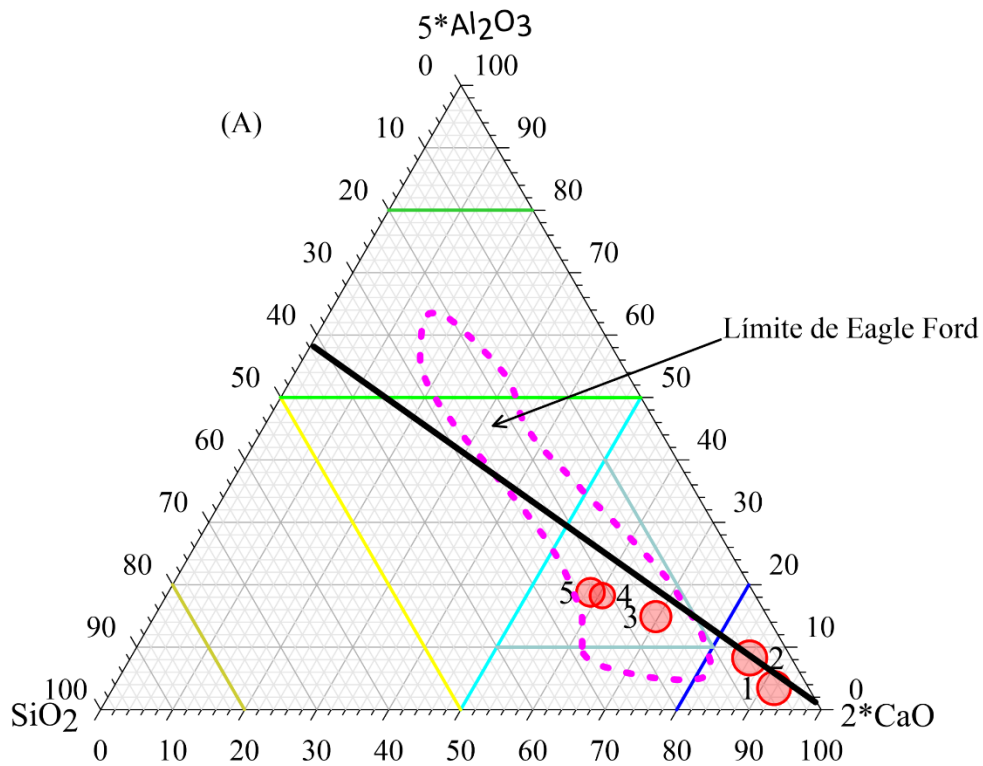


Figura 12. Relaciones de los contenidos de los elementos mayores en un gráfico Ternario $\text{SiO}_2 - 5\text{xAl}_2\text{O}_3 - 2\text{xCaO}$ (línea lutita promedio de Brumsack, (1989), límites de composición mineral para Eagle Ford de Passey y col., (2010) (A); (B) Relación Al% versus Si%, distingue relaciones de cuarzo libre, arcilla y la presencia de carbonatos de calcio. (tendencias tomadas de Rowe y col., (2008). La secuencia 1,2,3, representan las muestras de la Formación Buda; 4,5 representa la Formación Eagle Ford.

Las muestras en el contacto entre las formaciones Buda e Eagle Ford, se ubican en lo fundamental por debajo de la línea media de las arcillas según los valores de Brumsack, 1989; siguiendo estas máximas, la relación ternaria (Figura 12 A) indican sedimentos con bajos contenidos terrígenos (bajo Al_2O_3 y SiO_2 , respectivamente), y elevados contenidos de carbonatos (CaO), que reflejan también una alta producción biogénica.

La relación Al%/Si% (Rowe y col., 2008), permite discernir las tendencias de las litologías estudiadas (Fig. 12 B); y considerar un medio de sedimentación con alta concentración de carbonato, dado que la línea principal de tendencia de las muestras estudiadas sigue la deriva mostrada por la dilución del carbonato; a la que está ligada con frecuencia la precipitación de calcita (Golubic y Schneider, 1979), pero se ve afectada por la formación de dióxido de carbono a medida que altas concentraciones de materia orgánica se sedimentan; provocando la alternancia entre calizas y capas de arcillas con alta concentración de materia orgánica dentro

de la Formación Eagle Ford (Figura 12); una de las hipótesis que se han manejado para explicar esta alternancia (Denne y col., 2016).

Los elementos traza más utilizados para interpretar las condiciones paleoredox entre otros son Th y U, unido a las concentraciones de Mo, V, los valores de nuestro estudio se muestran en la Tabla 1 y 3, respectivamente. Estos elementos se disuelven en condiciones óxicas y precipitan en condiciones anóxicas; lo que permite distinguir los ambientes subóxicos de los anóxico-euxínicos (Jones, y Manning, 1994; Tribovillard y col., 2006).

El diagrama de relación U (ppm) y Th (ppm) (Figura 14 A), muestra la discriminación de un ambiente marino de depositación en las condiciones de acumulación de las secuencias estudiadas; según los valores $Th/U < 2$ representa un entorno reductor marino; $Th/U > 7$ representa un ambiente oxidante terrestre; $2 < Th/U < 7$ representa un período de transición entre el ambiente oxidante y el reductor marino (Kouamelan y col., 2020). A partir de estas consideraciones, los resultados ploteados en la Figura 14 A; permiten acercarnos a la caracterización de condiciones paleo-redox en el contacto entre las formaciones estudiadas. Los mismos muestran una depositación en condiciones marinas que varían de un ambiente oxidante a nivel del fondo marino a condiciones reductoras, ligado a los procesos de inundación de la plataforma y desarrollo de la OAE2 del Cenomaniano al Turoniano durante la acumulación de la formación Eagle Ford; en la Zona del Mar Interior Occidental, que se extiende desde

el Golfo de México hasta la zona polar (Figura 1), (reconocido en trabajos de Haq, 2014; Denne y col., 2014; Lowery y col., 2014)

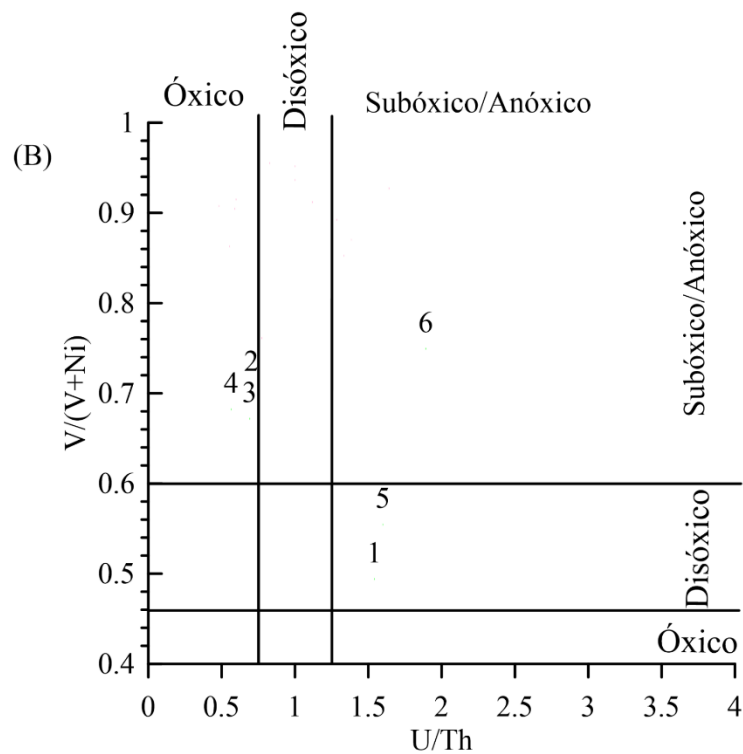
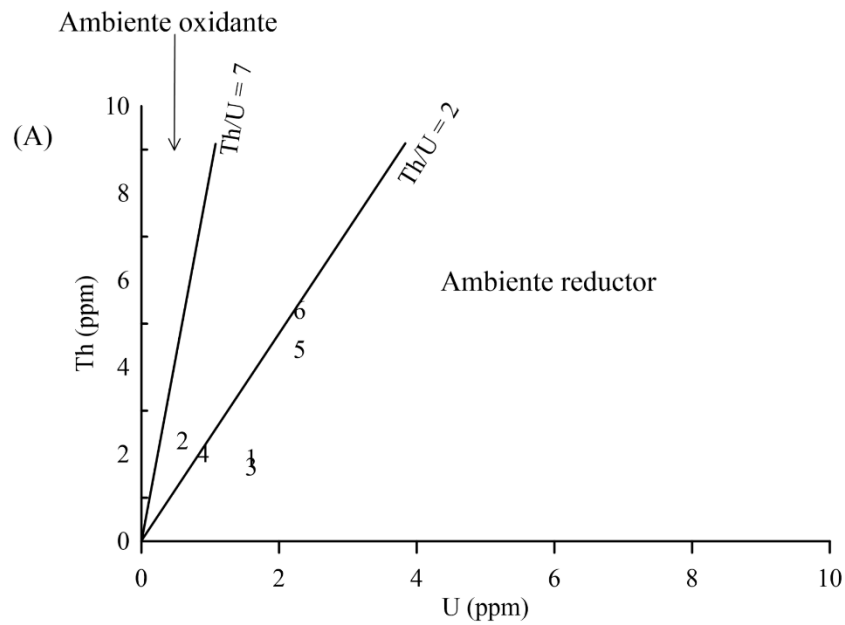


Figura 14. (A) Relación U/Th mostrando un ambiente general de depositación reductor (límites tomados de Kouamelan y col., (2020)). (B) (C) Relación U/Th vs $V/(V+Ni)$. Los rangos de U/Th son tomados de Jones y Manning (1994); $V/(V + Ni)$ tomados de Hatch y Leventhal (1992). (La secuencia 1,2,3, representan las muestras de la Formación Buda; 4,5 y 6 representa la Formación Eagle Ford).

Las relaciones de los elementos trazas V, Ni, pueden ser utilizados como índices geoquímicos para discriminar y dar información sobre las condiciones de paleoredox en ambiente de depositación a nivel de fondo marino; según propuestas de Hatch y Leventhal (1992), (Soua, 2011).

La relación $V/(V+Ni)$ de los datos en la Tabla 3, muestran valores superiores $> 0,80$ sugiriendo condiciones euxínicas, y un valor 0.76 indica condiciones anóxicas en el fondo marino; siguiendo sugerencias de Hatch y Leventhal (1992).

La utilización conjunta de elementos trazas indicadores de paleoambientes pueden usarse para dar información sobre el nivel de paleo-oxígeno de los ambientes de depósito (Soua, 2011). La relación $V/(V + Ni)$ vs U/Th (Figura 14 B) muestran variaciones de ambientes óxicos hasta anóxicos en un ambiente marino; coincidentes con las relaciones de las asambleas de fósiles descritas en el perfil estudiado (Figura 8, 9) y los cambios eustáticos del nivel del mar, variables en los periodos de la inundación de la plataforma (Wehner y col., 2017).

Salidas activas de hidrocarburo en la Formación Buda.

Las investigaciones geológicas-estructurales de Díaz (1952), estudiaron razones para explorar y explicar la presencia de hidrocarburos en el área del contacto entre las formaciones Buda e Eagle Ford, según un modelo convencional de sistema petrolero, basado entre otros por la presencia de abundante gas, más algunas manifestaciones de petróleo en profundidad (Pozo Cloete-1) y manifestaciones superficiales reconocidas dentro de la formación Eagle Ford y Buda (Díaz, 1952). La presencia de petróleo en las grietas dentro de la Formación Buda, en el área de estudio, se puede explicar a partir de la presencia de rocas madres reconocidas a nivel del Jurásico y Cretácico inferior (Díaz, 1952, Eguiluz de Antuñano, 2001; CNH, 2018a). La Tabla 4 muestra los valores de las rocas madres definidas para la región de Buro-Picachos por los trabajos de la Comisión Nacional de Hidrocarburos de México (CNH, 2018).

Tabla 4. Rocas generadoras para la región Burro-Picachos, (tomado de informe CNH, 2018a).

Roca generadora	Litología	Tipo de kerógeno	Carbono Orgánico Total COT (%)	Madurez (Ro%)
Fm. La Casita (Jurásico Superior (Kimeridgiano-Titoniano))	lutitas y calizas arcillosas	II-III	Menor 0.5 a mayor de 4	1.4-2.7
Fm. La Peña (Aptiano Superior)	calizas arcillosas y lutitas	II-III	0.2-3	1-2
Fm. Eagle Ford (Cenomaniano-Turoniano)	Lutitas y calizas arcillosas	II-III	0.6-5	0.2 a mayor de 1.2

Las secuencias de la Formación La Casita (Jurásico superior) son consideradas como la más importante generadora de hidrocarburos dado su contenido orgánico, espesor y distribución regional dentro de la Cuenca de Sabinas (Eguiluz de Antuñano, 2001, CNH, 2018). La Formación La Peña en la Cuenca de Sabinas y su equivalente en la Cuenca de Maverick, Formación Pearsall, del Cretácico inferior, también han sido evaluadas como rocas generadoras (Hackley, 2012; Ortiz-Treviño y col., 2023). Así como la formación Eagle Ford, probada como generadora de petróleo y gas para un modelo no convencional dentro de las cuencas de Maverick, Sabinas, y Burgos entre otras (Ortiz-Treviño y col., 2023).

La descripción de la salida de hidrocarburos pesados en el contacto entre las Formaciones Buda e Eagle Ford en el área de estudio, Figura 5, es un nuevo reporte, que confirman la generación y migración de los hidrocarburos; sobre y en los flancos del Levantamiento Burro-Peyotes, a tenor de la presencia de rocas generadoras desde el Jurásico al Cretácico (CNHI 2018a y b), conectadas por los sistemas de fallas (Figura 3), que modelan las relaciones entre las diferentes secuencias y sirven de canales de distribución de los fluidos; a priori, destacamos que ese petróleo moviéndose por las fallas y fracturas, puede afectar la calidad de los acuíferos profundos.

Conclusiones

El conjunto de resultados y evidencias estudiadas en afloramientos del corte de la carretera Nueva Rosita-Allende sobre la estructura del Levantamiento Burro-Peyotes muestra un contacto discordante entre las formaciones Buda e Eagle Ford; permitiendo reconocer y correlacionar el límite entre las series Comanche y Del Golfo sobre la paleoplataforma Comanche, importante límite como índice de prospección, magnificado por la salida a superficie de hidrocarburos por las grietas de las calizas de la Formación Buda. La asamblea de foraminíferos permite reconocer la transición del Cenomaniano al Turoniano. Así mismo existe la evidencia ambiental de condiciones óxicas/disóxicas dada la aparición conjunta de los fósiles béticos *Inoceramus* y las icnoformas de *Thalasinoides*.

Las relaciones de los elementos trazas U/Th en conjunción con V/ (V + Ni)) sugieren que las secuencias sedimentarias se depositaron en condiciones marinas variables desde oxidantes a anóxicas, pasando por condiciones disóxicas/óxicas; este proceso debió ser producto a los cambios de los ciclos cortos de los movimientos eustáticos del nivel del mar sobre la paleoplataforma.

Referencias

Atar, E., März, C., Schnetger, B., Wagner, T., & Aplin, A. (2019). Local to global controls on the deposition of organic-rich muds across the Late Jurassic Laurasian Seaway. *Journal of the Geological Society*, 176: 1143–1153. DOI: 10.1144/jgs2019-03

Blanco, J., Brito, L., Carmenates, Y., Batista, J., Rodríguez, A., Diaz, R., & Batista, R. (2021). Espectrometría de rayos gamma y análisis de facies en la Formación Eagle Ford: localidad Los Azules, norte de Coahuila. *CienciAcierta*, 65: 1-16.

Brumsack, H. (1989), Geochemistry of recent TOC-rich sediments from the Gulf of California and the Black Sea. *Geologische Rundschau*, 78: 851–882. DOI: 10.1007/BF01829327

Campbell, C. V. (1967). Lamina, lamina set, bed and bedset: *Sedimentology*, 8: 7–26. DOI:10.1111/j.1365-3091.1967.tb01301.x

Carsey, D. (1926). Foraminifera of the Cretaceous of central Texas: *University of Texas Bulletin*, 2612: 1-56.

Carrasco, B., Ontiveros, E., Martínez, L. & Herrera., J. (2002). Informe de la carta geológico-minera Piedras Negras clave H14-10, escala 1:250,000: Estado de Coahuila. [En línea]. Disponible en: https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/CartografiaWeb/T052002R/AGJ0001_01.pdf. Fecha de consulta: 15 de abril 2023.

Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH) (2018 a). Atlas geológico cuencas Sabinas – Burgos. [En línea]. Disponible en: https://hidrocarburos.gob.mx/media/3093/atlas_geologico_cuencas_sabinas-burgos_v3.pdf. Fecha de Consulta: 14 de abril 2023

Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH) (2018 b). Atlas geológico recursos no convencionales. [En línea]. Disponible en: https://hidrocarburos.gob.mx/media/3095/atlas_geologico_no_convencional_es_v3.pdf. Fecha de consulta: 20 de marzo 2023.

Chávez-Cabello, G., Aranda-Gómez, J., Molina- Garza, R.S., Cossío-Torres, T., Arvizu- Gutiérrez, I.R., & González-Naranjo, G.A. (2005). La falla San Marcos: una estructura jurásica de basamento multirreactivada del noreste de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57 (1): 27-52. DOI: 10.18268/bsgm2005v57n1a2

Craigie, N. (2018). *Principles of Elemental Chemostratigraphy, Advances in Oil and Gas Exploration and Production*. Switzerland: Ed. Springer International Publishing, 180 Pp.

Cushman, J.A. (1938). Cretaceous species of *Guembelina* and related genera. *Contributions from the Cushman Laboratory for Foraminiferal Research*, 14(1): 2–28

Davison, I., Pindell, J. & Hull, J. (2022). The basins, orogens and evolution of the southern Gulf of Mexico and Northern Caribbean. *Geological Society, London, Special Publications*, 504: 1–27. DOI: 10.1144/SP504-2020-218

Dawson, W. C. (2000). Shale microfacies: Eagle Ford Group (Cenomanian-Turonian) north-central Texas outcrops and subsurface equivalents. *GCAGS*

Transactions, 50: 607–621. DOI: 10.1306/8626C005-173B-11D7-8645000102C1865D

Denne, R., Hinote, R., Breyer, J, Kosanke, T., Lees, J., Engelhardt-Moore, N., Spaw, J. & Tur, N. (2014). The Cenomanian-Turonian Eagle Ford Group of South Texas: Insights on timing and paleoceanographic conditions from geochemistry and micropaleontologic analyses. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 413: 2-28. DOI: 10.1016/j.palaeo.2014.05.029

Denne, R., Callender, A., Hinote, H., Kariminia, M., Kosanke, T., Kita, Z., Lees, J., Rowe, H., Spaw, J. & Tur, N. (2016). Biostratigraphic and geochemical constraints on the stratigraphy and depositional environments of the Eagle Ford and Woodbine Groups of Texas. In J. A. Breyer. (ed.), *The Eagle Ford Shale: A renaissance in U.S. oil production: AAPG Memoir 110*: 1–86.

Díaz, T. (1952). Geología estructural del anticlinal Peyotes. *Boletín de la asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, VI: 117-147.

Donovan, A., Staerker, T., Pramudito, A., Weiguo, L., Corbett, M., Lowery, C., Romero, A. & Gardner, R. (2012). The Eagle Ford outcrops of West Texas: a laboratory for understanding heterogeneities within unconventional mudstone reservoirs. *Gulf Coast Association Geological Societies Journal*. 1: 162-185.

Donovan, A., Gardner, R., Pramudito, A., Staerker, T., Wehner, M., Corbett, M., Lundquist, J., Romero, A., Henry, L., Rotzien, J. & Boling, K. (2015). Chronostratigraphic relationships of the Woodbine and Eagle Ford groups across Texas. *Gulf Coast Association Geological Societies Journal*. 4: 67-87.

Driskill, B., Suurmeyer, N., Rilling-Hall, S., Govert, A. & Garbowicz, A. (2012). Reservoir description of the subsurface Eagle Ford Formation, Maverick Basin area, South Texas, USA. *European Association of Geoscientists and Engineers Annual Conference and Exhibition*. Copenhagen, Denmark. DOI:10.2118/154528-MS.

Dunham, R.J. (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham, W., E. (ed.) *Classification of Carbonate Rocks*. *American Association of Petroleum Geologists. Memoir 1*: 108–121.

Eguiluz de Antuñano, S. (1991). Discordancia cenomaniense sobre la plataforma de Coahuila. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*.41: 1-17. [En línea]. Disponible en:
https://www.amgp.org/api/administration/publicaciones/5db9e8da6a865_1991_Ene_Jun_01.pdf. Fecha de consulta: 21 de febrero 2024

Eguiluz de Antuñano, S. (2001). Geologic evolution and gas resources of the Sabinas Basin in northeastern Mexico, In C. Bartolini, R. T. Buffler, and A. Cantú-Chapa, (Eds.), *The western Gulf of Mexico Basin: Tectonics,*

sedimentary basins, and petroleum systems: American Association of Petroleum Geologists Memoir 75: 241-270.

Ehrenberg, N. & Svana, T. (2001). Use of spectral gamma-ray signature to interpret stratigraphic surfaces in carbonate strata: An example from the Finnmark carbonate platform (Carboniferous-Permian), Barents Sea. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 85: 295-308. DOI: 10.1306/8626C7C1-173B-11D7-8645000102C1865D

Eldrett, J., Dodsworth, P., Bergman, S., Wright, M. & Minisini, D. (2017). Water-mass evolution in the Cretaceous Western Interior Seaway of North America and equatorial Atlantic. *Climate of the Past*. 13: 855–878. DOI: 10.5194/cp-13-855-2017

Enciso-Cárdenas, J., Núñez-Useche, F., Camacho Ortegón, L., de la Rosa-Rodríguez, G., Martínez-Yañez, M. & Gómez Borrego, A. (2021). Paleoenvironment and source-rock potential of the Cenomanian-Turonian Eagle Ford Formation in the Sabinas basin, northeast Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 108:103-184. DOI: 10.1016/j.jsames.2021.103184

Ferrill, D., McGinnis, R., Morris, A, Smart, K., Sickman, Z., Bentz, M. & Evans, M. (2014). Control of mechanical stratigraphy on bed-restricted jointing and normal faulting: Eagle Ford Formation, south-central Texas. *American*

Association of Petroleum Geologists Bulletin, 98(11): 2477–2506.

DOI:10.1306/08191414053

Gabriel, J., Reinhardt, E., Chang, X. & Bhattacharya, J. (2022). Application of μ XRF analysis on the Upper Cretaceous Mancos Shale: A comparison with ICP-OES/MS. *Marine and Petroleum Geology*. 140. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2022.105662

Gardner, R., Pope, M.C., Wehner, M.P. & Donovan, A.D. (2012). Comparative stratigraphy of the Eagle Ford Group strata in Lozier Canyon and Antonio Creek, Terrell County, Texas. *Gulf Coast Association of Geological Societies Journal*, 1:42–52.

Golubic, S. & Schneider, J. (1979). Carbonate dissolution. In P. Trudinger and D. Swaine (Eds.), *Studies in Environmental Science*: (pp. 107-129). Elsevier, DOI: 10.1016/S0166-1116(08)71056-2.

González-Betancourt, A., González Partida, E., Piedad Sánchez, N., Carrillo Chávez, A., González Ruiz, L. E. & González-Ruiz, D. (2020). Diagénesis de la Formación Eagle Ford y sus marcadores térmicos como productora de gas no convencional. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 72:2. DOI: 10.18268/BSGM2020v72n2a151219

Hackley, P. (2011). Geological and geochemical characterization of the Lower Cretaceous Pearsall Formation, Maverick Basin, south Texas: A future shale

gas resource?. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 1449-1482. <https://doi.org/10.1306/11221111071>

Haq, B. (2014). Cretaceous Eustasy Revisited. *Global and Planetary Change*, 113: 44-58. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2013.12.007

Hatch, J. & Leventhal, J. (1992). Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U.S.A. *Chemical Geology*. 99: 65-82. DOI: 10.1016/0009-2541(92)90031-Y

Herron, S. & Herron, M. (1996). Quantitative lithology: An application for open and cased hole spectroscopy. *Proceedings of the 37th Annual Society of Petrophysicists and Well Log Analysts Logging Symposium*, 1–14. [En línea]. Disponible en: https://www.petroleumengineers.ru/sites/default/files/spwla-1996-e_0.pdf. Fecha de consulta: 12 de enero de 2024.

Jones, B. & Manning, D. (1994). Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. *Chemical Geology*, 111: 1–4. 111-129. DOI: 10.1016/0009-2541(94)90085-X

Jones, M., Sageman, B. & Meyers, S. (2018). Turonian sea level and paleoclimatic events in astronomically tuned records from the tropical North Atlantic and

Western Interior Seaway. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 33:470–492. DOI: 10.1029/2017PA003158

Kouamelan, K, Zou, C, & Wang, C. (2020). Multifractal characterization of the Coniacian–Santonian OAE3 in lacustrine and marine deposits based on spectral gamma ray logs. *Scientific Reports* 10: 14363. DOI: 10.1038/s41598-020-71327-w

Lehmann, C., Osleger, D., Montañez, I., Sliter, W., Vanneau, A. & Banner, J. (1999). Evolution of Cupido and Coahuila carbonate platforms, Early Cretaceous, northeastern Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 111: 1010-1029. DOI: 10.1130/0016-7606

Liro, L. M., Dawson, W. C., Katz, B. J. & Robison, V. D. (1994). Sequence Stratigraphic Elements and Geochemical Variability within a “Condensed Section”: Eagle Ford Group, East-Central Texas. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 44: 393-402. DOI: 10.1306/A25FEF81-171B-11D7-8645000102C1865D

Loucks, R., Gates R. & Zahm, C. (2019). Depositional systems, lithofacies, nanopore to micropore matrix network, and reservoir quality of the upper Cretaceous (Cenomanian) Buda Limestone in Dimmit County, southwestern Texas. *Gulf Coast Association of Geological Societies Journal*. 8: 281-300.

- Lowery, C., Corbett, M., Leckie M., Watkins, D., Romero, A. & Pramudito, A. (2014)
Foraminiferal and nanofossil paleoecology and paleoceanography of the
Cenomanian–Turonian Eagle Ford Shale of southern Texas,
Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. DOI:
10.1016/j.palaeo.2014.07.025
- Lu, Y., Weber, R., Roederer, R., Reilly, T., Edmunds, J., Myers, N. & Avery, A. (2019)
Biostratigraphic Chart - Gulf Basin, USA. Cretaceous and Late Jurassic.
Paleo Data. [En línea]. Disponible en: <https://www.paleodata.com/chart/>.
Fecha de consulta: 12 de enero de 2024.
- Luterbacher, H. & Premoli Silva, I. (1962). Note préliminaire sur une révision du profil
de Gubbio, Italie. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 68: 253–88.
- Minisini, D., Eldrett, J., Bergman, S. & Forkner, R. (2018). Chronostratigraphic
framework and depositional environments in the organic-rich, mudstone-
dominated Eagle Ford Group, Texas, USA. *Sedimentology*, 65(5): 1520–
1557. DOI:10.1111/sed.12437
- Morrow, A. L. (1934). Foraminifera and ostracoda from the Upper Cretaceous of
Kansas. *Journal of Paleontology*, 8: 186-205
- Núñez-Useche, F., Barragan, R., Moreno-Bedmar, J. & Canet, C. (2014). Archivos
mexicanos de Eventos Anóxicos Oceánicos del Cretácico de orden mayor.
Boletín Sociedad Geológica Mexicana. 66: 491-505

Ortiz-Treviño, J., Camacho-Ortegón, L.F., Enciso-Cárdenas, J.J., De La Rosa-Rodríguez, G., Núñez-Useche, F., Martínez-Carrillo, D. & Bueno-Tokunaga, A. (2023). Organic richness and source rock potential of the La Peña Formation in the Sabinas and Piedras Negras basins, NE of Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 40: 241-253. DOI: 10.22201/cgeo.20072902e.2023.3.1742

Passey, Q.R., Bohacs, K.M., Esch, W.L., Klimentidis, R. & Sinha, S. (2010). Geologic and petrophysical characterization of source rocks and shale-gas reservoirs. *American Association of Petroleum Geologists Search and Discovery*. [En línea]. Disponible en: https://www.searchanddiscovery.com/pdfz/abstracts/pdf/2010/kiev/abstracts/ndx_Passey.pdf.html

Pessagno, E. A. (1967). Upper Cretaceous planktonic foraminifera from the western Gulf Coastal Plain. *Palaeontographica Americana*. 5: 245-445

Pindell, J., Villagómez, D., Molina-Garza, R., Graham, R. & Weber, B. (2020). A revised synthesis of the rift and drift history of the Gulf of Mexico and surrounding regions in the light of improved age dating of the Middle Jurassic salt. In I. Davison, J. N. F. Hull, & J. Pindell (Eds.), *The Basins, Orogens, and Evolution of the Southern Gulf of Mexico and Northern Caribbean*. (504(1), pp. 29–76). Geological Society. DOI: <https://doi.org/10.1144/SP504-2020-43>

Postuma, J. A. (1971). *Manual of planktonic foraminifera*. Amsterdam: Ed. Elsevier Publishing Co. 420 Pp.

Ramkumar, M. (1999). Role of chemostratigraphic technique in reservoir characterisation and global stratigraphic correlation. *Indian Journal of Geochemistry*. 14: 33-45.

Ramkumar, M. (2015). *Chapter 1 - Toward Standardization of Terminologies and Recognition of Chemostratigraphy as a Formal Stratigraphic Method*. In Mu. Ramkumar (Ed.), *Chemostratigraphy*, Elsevier. 1-21. DOI:10.1016/B978-0-12-419968-2.00001-7

Reineck, H.E. & Singh, I.B. (1980). *Depositional Sedimentary Environments*. New York: Ed. Springer-Verlag. 439 Pp.

Rowe, H., Loucks, R., Ruppel, S. & Rimmer, S. (2008). Mississippian Barnett Formation, Fort Worth Basin, Texas: bulk geochemical inferences and Mo-TOC constraints on the severity of hydrographic restriction. *Chemical Geology*, 257: 16–25

Rowe, H., Hughes, N. & Robinson, K. (2012). The quantification and application of handheld energy-dispersive x-ray fluorescence (ED-XRF) in mudrock chemostratigraphy and geochemistry. *Chemical Geology*, 324-325. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2011.12.023

- Sandwell, D., Müller, R, Smith, W., Garcia, E. & Francis, R. (2014). New global marine gravity model from Cryo-Sat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure. *Science*, 346: 65-67. DOI: 10.1126/science.1258213
- Scott, R., Yulin, W., Rachel, R. & Xin, L. (2016). Albian rudist biostratigraphy (Bivalvia), Comanche shelf to shelf margin, Texas. *Carnets de Geologie*, 16: 513-541. DOI 10.4267/2042/61701
- Shanmugam, G. (2021). The turbidite-contourite-tidalite-baroclinite-hybridite problem: orthodoxy vs. empirical evidence behind the “Bouma Sequence. *Journal of Paleogeography*, 10. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42501-021-00085-1>
- Slattery, J., Cobban, W., McKinney, K., Harries, P. & Sandness, A. (2013). Early Cretaceous to Paleocene paleogeography of the Western Interior Seaway: The interaction of eustasy and tectonism. In M. Bingle-Davis, (Ed.), *Wyoming Geological Association Guidebook, 68th Annual Field Conference* (pp. 2-60). Wyoming. DOI: 10.13140/RG.2.1.4439.8801
- Soua, M. (2011) Productivity and bottom water redox conditions at the Cenomanian-Turonian Oceanic Anoxic Event in the southern Tethyan margin, Tunisia. *Revue Méditerranéenne de l'Environnement*. 4: 653–664.
- Sloss, M., Krumbein, W. & Dapples, E. (1949). Integrated facies analysis, Sedimentary Facies in Geologic History. In C. Longwell, R. Moore, E. McKee,

- S. Müller, E. Spieker and H. Wood *Sedimentary Facies in Geologic History*. Geological Society of America. DOI: <https://doi.org/10.1130/MEM39-p91>
- Stern, R. & Dickinson, W. (2010). The GoM is a Jurassic backarc basin. *Geosphere*, 6: 739–754. DOI: 10.1130/GES00585.1
- Tribovillard, N., Algeo, T., Lyons, T. & Riboulleau, A. (2006). Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update. *Chemical Geology*. 232: 12–32. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2006.02.012
- Valencia, F., Buatois, L., Laya, J., Mangano, M., Valencia, G. & Pope, M. (2021). Depositional environments and controls on the stratigraphic architecture of the Cenomanian Buda Limestone in west Texas, U.S.A. *Marine and Petroleum Geology*. 133: 1-20. DOI 10.1016/j.marpetgeo.2021.105275
- Wehner, M., Gardner, M., Tice, M., Pope, M., Donovan A., & Staerker, T. (2015). Anoxic, storm-dominated inner carbonate ramp deposition of Lower Eagle Ford Formation, West Texas. *Society of Petroleum Engineers/AAPG/Society of Exploration Geophysicists Third Unconventional Resources Technology Conference, San Antonio, Texas, July 22–25, 2015, URTEC-2154667-MS*, 16 p. DOI:10.15530/urtec-2015-2154667
- Wehner, M., Gardner, M., Pope, A. & Donovan, A. (2017), The Eagle Ford Group returns to Big Bend National Park, Brewster County, Texas. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 67: 657.

Wilmsen, M. (2017). Macroinvertebrate fauna and depositional environment of the lower Upper Cenomanian Oberhäslich Formation in the Saxonian Cretaceous Basin (Germany). *Annales de Paléontologie*, 103: 33-44.

Desde el genoma a las proteínas del Virus del Síndrome Respiratorio Agudo Severo-Coronavirus 2 (SARS-CoV-2), una revisión

From the genome to the proteins of the Acute Respiratory Syndrome Virus Severe-Coronavirus 2 (SARS-CoV-2), a review

Michelle Santoyo Suárez ¹, Jacziry Constante¹, Aylin Arce Hernandez¹, a Mayela del Angel Martínez ¹, Gilberto Esquivel Muñoz ¹, Jesus Morlett Chávez ^{1*}, Carlos Barrera Ramirez ², Julio Martínez Gallegos ²

¹ Laboratorio de Biología Molecular, Departamento de Investigación en Salud, Facultad de Medicina, Universidad Autónoma de Coahuila (UA de C). Calle Francisco Murguía Ser No. 205. Zona Centro, Saltillo, Coahuila, México. CP. 25000.

² Departamento de Medicina Interna, Departamento de Investigación y Enseñanza, Hospital Universitario "Dr. Gonzalo Valdés Valdés, UAdeC. Calzada Francisco I. Madero No. 1291. Zona Centro, Saltillo, Coahuila, México. CP. 25000.

*Autor para correspondencia: Jesus Morlett Chávez, Correo electrónico antonimorlett@uadec.edu.mx; ORCID: 0000-0001-7988-423X

Resumen

A finales del 2019 emergió el virus conocido como el virus del Síndrome Respiratorio Agudo Severo-Coronavirus 2 (SARS-CoV-2) provocando la enfermedad COVID19. En el 2020, el SARS-CoV-2 se había esparcido por Europa y África, hasta llegar al continente americano. El SARS-CoV-2 es de ARN de cadena sencilla, sentido positivo, el cual, codifica para proteínas estructurales, proteínas no estructurales y proteínas accesorias. Cabe mencionar que existe escasa información de la biología del SARS-CoV-2, sin embargo, su parecido con el SARS-CoV, permite hipotetizar las funciones de cada proteína. Además, se ha observado que el genoma de SARS-CoV-2 presenta variantes génicas, pero la expresión y función de las variantes proteicas aun es desconocida. Los signos y síntomas causados por COVID19, son comparados a los que produce el virus de la influenza H1N1, incluidos la tos, temperatura elevada, disnea, diarrea, debilidad y fatiga, entre otros. Para el diagnóstico, se cuenta con métodos moleculares como detección de anticuerpos (IgG e IgM), pero estos resultan ser de poca especificidad. Por otro lado, la reacción en cadena de la polimerasa - transcriptasa reversa, es el método más confiable para identificar el SARS-CoV-2. El tratamiento clínico en pacientes con COVID19 incluye medidas de prevención y control de infecciones; sin embargo, no existe tratamiento específico. Algunos tratamientos propuestos, son inhibidores de los receptores ACE2, inhibidores de la ARN polimerasa dependiente de ARN, entre otros. En el presente trabajo, se pretende hacer una búsqueda y discusión de la información en proteómica que sirva de base para desarrollar estrategias diagnósticas y terapéuticas en contra del SARS-CoV-2 y del COVID19.

Palabras clave: SARS-CoV-2, COVID19, Proteómica, ARN viral.

Abstract

In late 2019, the virus known as SARS-CoV-2 emerged, causing the disease COVID19. In 2020, SARS-CoV-2 had spread throughout Europe and Africa, until

reaching the American continent. SARS-CoV-2 is a single-stranded, positive-sense RNA that encodes for structural proteins, non-structural proteins, and accessory proteins. It is worth mentioning that there is little information on the biology of SARS-CoV-2; however, its similarity to SARS-CoV, allows us to hypothesize the functions of each protein. Furthermore, the SARS-CoV-2 genome has gene variants, but the expression and function of protein variants are still unknown. The signs and symptoms caused by COVID19 are compared to those produced by the H1N1 influenza virus, including cough, high temperature, dyspnea, diarrhea, weakness, and fatigue, among others. For diagnosis, there are molecular methods such as detection of antibodies (IgG and IgM), but these are little specificity. On the other hand, the polymerase chain reaction - reverse transcriptase, is the most reliable method to identify SARS-CoV-2. Clinical treatment in patients with COVID19 includes infection prevention and control measures; however, there is no specific treatment. Some proposed treatments are ACE2 receptor inhibitors, RNA-dependent RNA polymerase inhibitors, among others. In the present work, the aim is to search and discuss the information on proteomics that serves as the basis for developing diagnostic and therapeutic strategies against SARS-CoV-2 and COVID19.

Keywords: SARS-CoV-2, COVID19, Proteomic, ARN viral

Introducción

A principio del 2020, México y aproximadamente 185 países más, atraviesan por una pandemia causada por el SARS-CoV-2 (severe acute respiratory síndrome coronavirus 2) (Wu y col., 2020; Zhang, 2020). El SARS-CoV-2, hasta donde se conoce, es responsable de enfermedades y complicaciones respiratorias conocidas como COVID19 (coronavirus disease) e incluso el deceso de miles de personas (Cao y col., 2020; Coronaviridae Study Group of the International Committee on Taxonomy of, 2020; Lai y col., 2020). Sin embargo, se estima que más del 20% de los pacientes podrían ser asintomáticos (Wang y col., 2020).

Existen, otros patógenos relacionados con enfermedades respiratorias, donde se incluyen, adenovirus, coronavirus, bocavirus humano, metaneumovirus humano, virus de la parainfluenza, rinovirus y virus sincitial respiratorio (Lai y col., 2020). Aunque estudios previos reportaron la presencia de SARS-CoV-2 en peces y animales nativos de China, se desconoce la transmisión del virus desde los animales al humano (Lai y col., 2020; Lokman y col., 2020).

El SARS-CoV-2 es un nuevo coronavirus asociado con el virus que provoca el síndrome respiratorio severo-agudo (SARS) y el síndrome respiratorio del Medio Oriente (Jiang y col., 2020). El genoma de este virus es ARN con sentido positivo y su secuencia nucleotídica es altamente similar al coronavirus que infecta a los murciélagos (Jiang y col., 2020; Lai y col., 2020; Lokman y col., 2020). Además, SARS-CoV-2 presenta mutaciones de inserción en la proteína S (Spike-Espícula) en comparación con la misma proteína del SARS-CoV (Lokman y col., 2020). La proteína S reconoce el dominio de unión al receptor (RBD), y es un determinante crítico para la entrada del virus a la célula hospedadora. Sin embargo, las dianas del resto de las proteínas virales se mantienen desconocidas, lo cual, limita el conocimiento de la respuesta inmune y patogénesis (Li y col., 2020). En consecuencia, esto también provoca un impedimento para desarrollar fármacos antivirales y el diseño de nuevas estrategias terapéuticas (Li y col., 2020; Lokman y col., 2020). En el presente trabajo, se pretende hacer una búsqueda y discusión de la información en proteómica que sirva de base para desarrollar estrategias diagnósticas y terapéuticas en contra del SARS-CoV-2 y del COVID19.

1.1. Genoma viral

La biología del SARS-CoV-2 ha revelado varias características generales del virus. Los coronavirus contienen una envoltura proteica y requiere de varios procesos claves, mediados por la expresión de sus proteínas, para su interacción con la célula huésped (Leng y col., 2020). SARS-CoV-2 posee un genoma de ARN con sentido positivo y 30 kb de largo (Jiang y col., 2020; Lai y col., 2020). Este genoma

contiene aproximadamente 14 marcos de lectura abierto (ORF) traslapados, los cuales, codifican para 27 proteínas virales, 15 no estructurales, 8 accesorias y 4 proteínas estructurales (Lokman y col., 2020; Zhang, 2020).

Los genes ORF 1a y ORF 1ab, codifican para una poliproteína que sufre modificaciones post-traduccionales vía proteasas virales para formar 15 o 16 proteínas no estructurales (NSP) (Davidson y col., 2020). Específicamente, el ORF1ab codifica para la replicasa viral, que a su vez produce las 15 NSP; NSP1, NSP2 y NSP3, las cuales son cortadas por proteasa (papain-like proteinase, NSP3/PL-Pro) y el resto de las NSP son cortadas por otras proteínas virales (3C-like proteinase, NSP5/3CL-Pro) (Tabla 1) (Giri y col., 2020). Estas NSP participan en la síntesis del ARN viral y evasión inmune (Davidson y col., 2020). Específicamente, una de las proteínas NS es la ARN polimerasa no dependiente de ARN (*RdRp*), la cual presenta una similitud del 98.7% con su homóloga expresada por el coronavirus que infecta a *Rhinolophus* (Lai y col., 2020). En resumen, la NSP1, bloquea la subunidad 40's y el CAP de los ARNm; NSP2, rompe la vía de supervivencia celular y bloquea a Prohibitina 1 y 2; NSP3, afecta la fosforilación y activación de IRF3 y antagoniza al IFN; NSP4, produce vesículas para la replicación viral en la célula huésped; NSP5, es una proteasa que corta la replicasa 1a y 1ab; NSP6, forma el autofagosoma y autolisosoma para la producción de los viriones; NSP7-8, forman un complejo con la primasa independiente de iniciación de la replicación viral; NSP9, proteína de unión a la cadena sencilla de ARN; NSP10, estimula la actividad de MTasa (metiltransferasa) para la formación del CAP; NSP11, proteína sin caracterizar y de función desconocida; NSP12, RDRP, acarrea el primer independiente y primer dependiente durante la síntesis viral; NSP13, es una helicasa viral y desdobra los ADN y ARN virales de doble cadena; NSP14, actúa como Exoribonucleasa (Exon) y Metiltransferasa (mtasa); NSP15, Endonucleasa, emplea Mn^{2+} , NSP16, MTasa.

La Tabla 1 muestra las proteínas estructurales del SARS-CoV-2, éstas comprenden una glucoproteína S de 180 a 220 kilo-Dalton (kDa), proteína de envoltura “E” (Envelope), una glucoproteína de membrana “M” (Membrane), de 20 a 35 kDa que sirve de matriz y esta embebida en una doble capa lipídica, y proteína de la nucleocápside “N” (Nucleocapsid) de 50 a 60 kDa; mientras que ocho o nueve proteínas accesorias se producen a partir del ORF3a, ORF 6, ORF 7a ORF 8 y ORF 10 (Tabla 2) (Ahmed y col., 2020; Lokman y col., 2020; Zhang, 2020). Algunas proteínas accesorias se encuentran solo en el SARS-CoV-2, pero no en el resto de los coronavirus (Davidson y col., 2020). Mientras que algunos virus, incluido el coronavirus humano OC43 (HCoV-OC43), contienen una tercera glucoproteína (HE; 65 kDa) que causa hemaglutinación y tiene una actividad de acetilesterasa.

Tabla 1. Descripción de las proteínas estructurales y accesorias. Las SP y proteínas accesorias participan en el ensamble viral y reconocimiento de los receptores ACE2 en la célula huésped, sin embargo, lo descrito abajo, surge de la comparación entre proteínas SARS-CoV-2 y SARS-CoV/BatCoV. Cabe mencionar que aún falta información de la función de las proteínas por elucidar (Davidson y col., 2020; Giri y col., 2020).

SARS-CoV-2		
Proteína	Función	Homología
Espícula (S)	La glipoproteína S reconoce los receptores ACE2.	SARS-CoV= 77.1%. BatCoV = 77.1%.
Envoltura (E)	Ayuda en la morfogénesis de los viriones.	SARS-CoV= 96%. BatCoV = 100%.
Membrana (M)	Participa en el ensamble del virión.	SARS-CoV= 90.5%. BatCoV = 89.5%.
Nucleocápside (N)	Participa en la transcripción y ensamble del virión del CoV.	SARS-CoV= 90.0%. BatCoV = 89.0%.

Tabla 2. Descripción de los ORF. Proteínas derivadas de los ORF y su posible función en el SARS-CoV-2. Asimismo, se muestra la homología de los ORF’s SARS-CoV-2 versus SARS-CoV/BatCoV (Giri y col., 2020).

Proteína	Función/Homología
ORF3a-b	Forma canal del ion K en la membrana plasmática del huésped. 73%
ORF6	Antagonista del interferón (IFN). 68%
ORF7a-b	Libera citosinas y quimosinas proinflamatorias (IL-8 y RANTES). 87%
ORF8a-b	ORF8a interactúa con S y E. ORF8b interactúa con E, M. 90%
ORF9b	Interactúa con la exportina del núcleo para su translocación a este organelo. No se ha reportado este ORF en otros CoV.
ORF10	Se desconoce la función. 100%
ORF14	Se desconoce la función. 75%

1.1.1. Interacción con la célula huésped

La glicoproteína S presenta dos dominios S1 y S2, ambas participan en la entrada del virus al huésped (Davidson y col., 2020). El dominio S1 contiene el RBD para enlazarse con el receptor humano ACE2, mientras que el dominio S2 es responsable de la fusión con la membrana celular del huésped (Lokman y col., 2020). Reportes previos, indican que la proteína S es la región más variable del genoma de SARS-CoV-2, esto probablemente permita que se optimice la unión de S1-RBD al ACE2 (Andersen y col., 2020). Además, en este virus se observó una mutación, donde se insertan 12 nucleótidos entre la frontera de S1 y S2, este sitio se conoce como sitio de ruptura polibásico (PCS). A la fecha, se desconocen las consecuencias funcionales del PCS, pues no se encuentra en el resto de los virus que pertenecen al linaje de los *Betacoronavirus*. Sin embargo, PCS está presente en la proteína hemoaglutinina (HA) del virus aviar, por lo que se cree que el sitio PCS-S-CoV tiene funciones similares al PCS-HA (Andersen y col., 2020; Davidson y col., 2020). Otra característica de la proteína S, es que SARS-CoV-2 incluye residuos glicil en lugar de residuos prolil, esto permite a S incluir un giro distinto y por lo tanto un plegamiento diferente en comparación con la proteínas S del SARS-CoV y por lo tanto, SARS-CoV-2 proteína S incrementa su afinidad por

ACE2 (Gurwitz, 2020). Sin embargo, aunque se conoce la unión de la glicoproteína S al receptor ACE2, aun el conocimiento sobre la invasión a las células epiteliales de las vías respiratorias se mantiene incierto (Leng y col., 2020). Además, existe una controversia pues, ACE2 se expresa mayormente en riñones, ducto biliar y testículos, mientras que en pulmones mostró baja expresión de esta proteína, esto cuestiona el rol de ACE2 durante la infección pulmonar (Leng y col., 2020).

1.1.2. Filogenia

Por otro lado, los estudios filogenéticos confirman que el SARS-CoV-2 es miembro del género *Betacoronavirus* y subgénero *Sarbecovirus*, del mismo linaje que incluye el SARS-CoV y MERS (Figura 1) (Li y col., 2020; Lokman y col., 2020; Tang, 2020). Además, hay dos tipos de virus SARS-CoV-2 y son designados como L (70% de prevalencia) y S (30% de prevalencia) (Tang X, 2020). También, el genoma de SARS-CoV-2 es homólogo en 90-96% con el virus SARS de los murciélagos (BatCoV), y a su vez, este virus es divergente el 21% y 50% con respecto a SARS-CoV y MERS-CoV (Lai y col., 2020; Lai y col., 2020; Leng y col., 2020; Tang, 2020). Estudios previos, sugieren nuevas mutaciones en los sitios funcionales del RBD y de la proteína S del SARS-CoV-2. Sin embargo, falta describir la función de algunas proteínas tanto de las NSP, SP y proteínas accesorias. La descripción de esas proteínas permitiría completar el conocimiento de los mecanismos moleculares mediados por los virus durante la infección y evasión del sistema inmune, lo que conlleva al desarrollo de la Enfermedad por Coronavirus (COVID19).

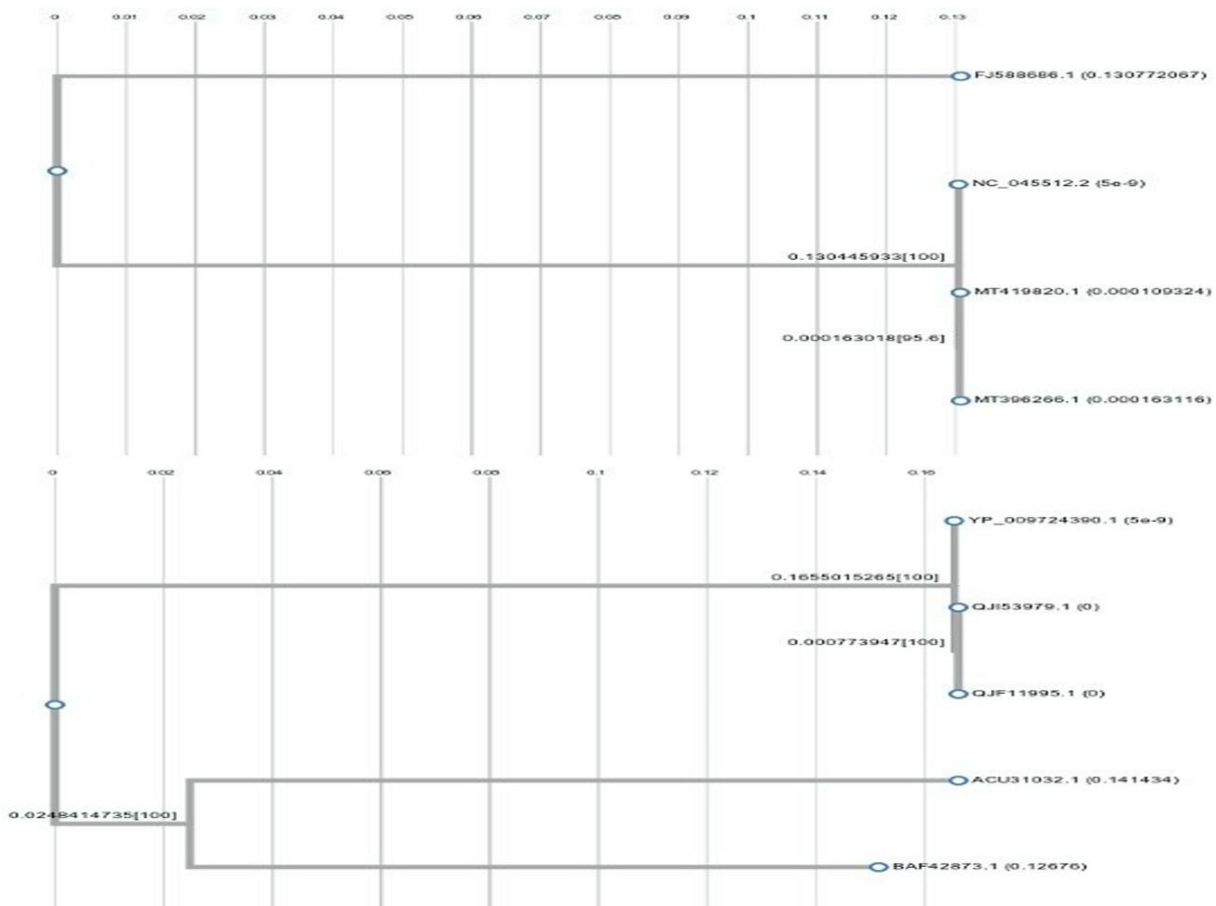


Figura 1. Análisis filogenético del SARS-CoV-2. El árbol filogenético muestra que el SARS-CoV está separado del SARS-CoV-2. El SARS-CoV-2 muestra homología con los virus presentes en los murciélagos Bat-CoV o SARS-CoVRaTG13. NC_045512.2 SARS-CoV-2 isolate Wuhan-Hu-1, genoma completo; FJ588686.1 Bat SARS CoV Rs672/2006, genoma completo; MT396266.1 SARS-CoV-2/mink/NLD/1/2020, genoma completo; MT419820.1 SARS-CoV2/human/USA/PR-CDC-S11/2020, genoma completo. La proteína S de los SARS-CoV también muestran cierta divergencia entre el Bat-CoV y el SARS-CoV-2. Asimismo, se observan pequeñas diferencias entre el SARS-CoV-2 aislado en Wuhan, China y el SARS-CoV2 aislado en Estados Unidos. YP_009724390.1 surface glycoprotein; QJI53979.1 surface glycoprotein; QJF11995.1 surface glycoprotein; BAF42873.1 spike glycoprotein; ACU31032.1 Bat spike protein.

1.2. COVID-19

COVID-19 es una enfermedad emergente que ha sido declarada pandemia y continúa esparciéndose rápidamente a nivel mundial (Grenga, 2020; Leng y col., 2020). El agente causal de la COVID19 es el nuevo serotipo, SARS-CoV-2. A fecha del 17 de mayo hay 4.7 millones de personas diagnosticadas y confirmadas alrededor del mundo; además, 314,476 muertes reportadas a nivel mundial por COVID19 (CSSE,2020; OMS). En México, existen 47,144 casos diagnosticados y confirmados, y se han registrado 5,045 muertes (CSSE,2020). Asimismo, en el Estado de Coahuila, México existen 644 casos confirmados y 54 muertes reportadas (Gobierno de México, 2020; OMS). Las características clínicas, la patogenia y el tratamiento, se mantienen por ser elucidados. Aunque, el SARS-CoV y SARS-Co2 presentan una homología del 79.5%, lo cual, pueda ayudar a elucidar la patogenia y posibles “dianas” para el desarrollo de anticuerpos versus SARS-CoV-2.

1.2.1. Sintomatología de la enfermedad

A finales del año 2019, los primeros pacientes de la comunidad de Wuhan, China, fueron diagnosticados con neumonía de causa desconocida (Tang, 2020; Wu y col., 2020). La neumonía causada por SARS-CoV-2 se caracteriza por su enorme destrucción a nivel pulmonar y progresiva falla respiratoria hasta llegar a la muerte (Jiang y col., 2020). El periodo de incubación del SARS-CoV-2 es de 5.2-6.4 días, mientras que el SARS-CoV presenta una media de 4.0 días y MERS-CoV tiene una media de 4.5-5.2 días (Jiang y col., 2020). Los principales síntomas son fiebre, catarro, disnea, dolor muscular, dolor de cabeza, diarrea y producción de esputo (Jiang y col., 2020; C. C. Lai y col., 2020; Y. Wang y col., 2020). Algunos pacientes también mostraron conteo de glóbulos blancos normal, neutropenia, leucopenia y linfopenia y elevada proteína C reactiva (Lai y col., 2020; Wang y col., 2020; Zhao y col., 2020). La biometría hemática de los pacientes COVID19 indicó extravasación y activación incontrolada de los neutrófilos (Li y col., 2020). Al

respecto, Han y col. (2020) observaron que la coagulación está claramente alterados en pacientes COVID19 en comparación con aquellos pacientes aparentemente sanos (Han y col., 2020). Específicamente, esos mismos autores, reportaron el incremento de los factores de coagulación, incluidos el dímero D, los productos de degradación fibrina/fibrinógeno (FDP), y Fibrinógeno (Fib) (Han y col., 2020; Zhao y col., 2020). Además, se ha observado la activación de Interleucinas (IL)-8 e IL-6 que son responsables de la quimiotaxis y reclutamiento de los neutrófilos (Li y col., 2020). Sin embargo, en pacientes fallecidos por causa del COVID19, se encontró una gran cantidad de macrófagos y neutrófilos en la cavidad alveolar pulmonar (Li y col., 2020). Asimismo, estos últimos hallazgos se presentaron en pacientes infectados con SARS-CoV. Además, SARS-CoV al igual que SARS-CoV-2 se replica en el tracto respiratorio bajo, promoviendo daño alveolar difuso (Leng y col., 2020). Pero, a pesar del daño pulmonar provocado por el COVID19, la tasa de mortalidad en promedio es del 6%, mientras que la tasa de mortalidad del SARS y MERS es del 9.6% y 34%, respectivamente (Jiang y col., 2020). Además, se observó que el 80% de las muertes atribuidas al COVID19 ocurrió en pacientes de más de 65 años de edad (Wang y col., 2020). Sin embargo, las características clínicas y de laboratorio arriba mencionadas todavía no son confirmadas y se requiere de métodos moleculares para el diagnóstico de COVID19.

1.2.2. Diagnóstico y Tratamiento COVID19

El adecuado y oportuno diagnóstico del SARS-CoV-2 es una “piedra angular” para proveer un tratamiento oportuno a los pacientes con COVID19. Actualmente, los datos clínicos y de laboratorio son insuficientes para descartar la presencia o ausencia del coronavirus. Las radiografías y tomografía computarizada (TAC) no han arrojado datos significativos para el diagnóstico oportuno de COVID19. A pesar de ello, se propuso para el diagnóstico SARS-CoV-2, historia epidemiológica, historia clínica (fiebre, síntomas respiratorios, disminución o

incremento en el conteo de glóbulos blancos y rayos X) (Wang y col., 2020). Además, se ha empleado la prueba ELISA (*enzyme linked immunosorbent assay*), tratando de encontrar IgM e IgG en los pacientes portadores de COVID19 (Wang y col., 2020; Zhang, 2020; Zhao y col., 2020). Sin embargo, todos los pacientes sospechosos deberían de ser confirmados por la reacción en cadena de la polimerasa cuantitativa (qPCR), y por la detección de anticuerpos contra algunas proteínas de la SARS-CoV-2 como son E, N, M y S. El empleo de la qPCR ha permitido observar la inconsistencia en el diagnóstico de COVID19, y los resultados falsos negativos (Wang y col., 2020). La qPCR es altamente sensible y específica, pero las inconsistencias principalmente se deben al tipo de muestra, diferentes estados de infección de los pacientes, la habilidad que se tiene al coleccionar la muestra, y a las mutaciones virales (Wang y col., 2020; Zhao y col., 2020). Zhao y col. (2020) reportaron que la detección de ARN viral disminuyó en 35% en muestras analizadas a los 7 días de tomarlas, y el 55% en las muestras analizadas a los 15-30 días (Zhao y col., 2020). La identificación de proteínas que responden a la infección viral puede ayudar a reforzar el diagnóstico, incluso en el tratamiento, relacionado al coronavirus (Wang y col., 2020).

1.2.3. Estrategias terapéuticas contra SARS-CoV-2 y COVID19

La similitud entre los genomas SARS-CoV y SARS-CoV-2 reveló que además de coincidir en el desarrollo de la enfermedad, también pueden coincidir en sus “dianas” y compartir la producción de anticuerpos en la célula huésped. En primera línea de defensa se encuentra con la producción de IgG e IgM (Wang y col., 2020). Zhao y col. (2020) reportó la presencia de anticuerpos contra SARS-CoV-2, sin embargo, esos anticuerpos no fueron identificados (Zhao y col., 2020). Asimismo, Zhang y col. (2020) reportaron posibles anticuerpos contra la proteína S (RBD), N, E, M y diferentes marcos de lectura de las proteínas accesorias (Zhang, 2020). Otros anticuerpos propuestos para el desarrollo de vacunas son la proteína S, la proteína transmembrana proteasa serina 2 (TMPRSS2) y la proteína

ACE (Zhang y col., 2020). Específicamente, se ha propuesto bloquear al receptor de ACE2, el receptor AT1R (*Angiotensin receptor 1*) (Gurwitz, 2020; Zhang y col., 2020). Como se mencionó anteriormente, el SARS-CoV-2 entra al huésped a través de ACE2, y posteriormente disminuye la expresión de ACE2, de modo que esta enzima no ejerce sus efectos protectores en los órganos. Teóricamente, una mayor expresión de ACE2 después de medicar crónicamente a pacientes infectados con SARS-CoV-2 con bloqueadores de AT1R, aunque parezca paradójico, puede protegerlos contra la lesión pulmonar aguda en lugar de ponerlos en mayor riesgo de desarrollar SARS. Esto puede explicarse por dos mecanismos complementarios: el bloqueo de la activación excesiva de AT1R mediada por angiotensina causada por la infección viral, así como la regulación positiva de ACE2, reduciendo así la producción de angiotensina por ACE y aumentando la producción de la vasodilatadora angiotensina (Gurwitz, 2020; Rice, 2004).

El tratamiento clínico recomendado de pacientes con COVID-19 incluye medidas de prevención y control de infecciones y atención de apoyo, incluido oxígeno suplementario y soporte ventilatorio mecánico cuando esté indicado. Al igual que en el manejo de cualquier enfermedad, las decisiones de tratamiento finalmente residen en el paciente y su proveedor de atención médica ("COVID-19 Treatment Guidelines Panel. Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Treatment Guidelines. National Institutes of Health," 2020) En algunos casos se ha recomendado el uso de agentes antivirales como oseltamivir oral (75mg/12h), o ganciclovir intravenoso (0.25g/12h). Sin embargo, por el momento no existen datos suficientes para realizar recomendaciones a favor o en contra de algún tipo de terapia específica, debido a la falta de ensayos clínicos definitivos para identificar tratamientos seguros y efectivos para esta enfermedad ("COVID-19 Treatment Guidelines Panel. Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Treatment Guidelines. National Institutes of Health," 2020). Por otro lado, se han empleado antiinflamatorios,

antibióticos y antifúngicos. Algunos fármacos empleados son los nucleósidos análogos, inhibidores de neuroaminidasa, inhibidores de la síntesis de ADN, clooquina, remdesivir y medicina tradicional (Lai y col., 2020).

La cloroquina e hidroxicloquina poseen potencial actividad antiviral de amplio espectro al aumentar pH endosómico requerido para la fusión virus/célula, además, interfirieren con las modificaciones post-traduccionales, específicamente la glucosilación de receptores celulares de SARS-CoV (Gao y col., 2020; Gautret y col., 2020; Yao y col., 2020). Aunque estos fármacos no están aprobados por la FDA para COVID-19, pero están disponibles en la Reserva Estratégica Nacional para adultos y adolescentes hospitalizados (con un peso ≥ 50 kg) bajo una Autorización de Uso de Emergencia ("COVID-19 Treatment Guidelines Panel. Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Treatment Guidelines. National Institutes of Health," 2020).

Conclusión

Ante la pandemia y rápido esparcimiento del SARS-CoV-2, investigadores de todo el mundo están tratando de elucidar la biología del virus emergente SARS-CoV-2. Aún se desconoce parcialmente la expresión de los genes virales a nivel de ARN y de proteínas. También, se desconoce la totalidad de la función de cada una de las proteínas virales, aunque, su alto grado de homología con SARS-CoV ha ayudado a elucidar esa información. Las características patológicas de COVID19 han sido establecidas, pues varía entre cada uno de los pacientes. Asimismo, el diagnóstico clínico específico no ha sido establecido y lo que más garantiza la presencia del virus en los pacientes es la qPCR. Por último, el tratamiento tampoco ha sido concretado; sin embargo, se han propuesto una serie de alternativas opcionales mientras se busca el desarrollo de vacunas eficientes para frenar la propagación del virus.

Referencias

- Ahmed, S. F., Quadeer, A. A., & McKay, M. R. (2020). Preliminary Identification of Potential Vaccine Targets for the COVID-19 Coronavirus (SARS-CoV-2) Based on SARS-CoV Immunological Studies. *Viruses*, 12(254): 1-15. <https://doi.org/10.3390/v12030254>
- Andersen, K. G., Rambaut, A., Lipkin, W. I., Holmes, E. C., & Garry, R. F. (2020). The proximal origin of SARS-CoV-2. *Nat Med*, 26(4): 450-452. <https://doi.org/10.1038/s41591-020-0820-9>
- Cao, Y., Li, L., Feng, Z., Wan, S., Huang, P., Sun, X., Wen, F., Huang, X., Ning, G., & Wang, W. (2020). Comparative genetic analysis of the novel coronavirus (2019-nCoV/SARS-CoV-2) receptor ACE2 in different populations. *Cell Discov*, 6(11): 1-4. <https://doi.org/10.1038/s41421-020-0147-1>
- Coronaviridae Study Group of the International Committee on Taxonomy of, V. (2020). The species Severe acute respiratory syndrome-related coronavirus: classifying 2019-nCoV and naming it SARS-CoV-2. *Nat Microbiol*, 5(4): 536-544. <https://doi.org/10.1038/s41564-020-0695-z>
- COVID-19 Treatment Guidelines Panel. Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Treatment Guidelines. National Institutes of Health. (2020). <https://www.covid19treatmentguidelines.nih.gov/>.
- Davidson, A. D., Williamson, M. K., Lewis, S., Shoemark, D., Carroll, M. W., Heesom, K., Zambon, M., Ellis, J., Lewis, P. A., Hiscox, J. A., & Matthews, D. A. (2020). Characterisation of the transcriptome and proteome of SARS-CoV-2 using direct RNA sequencing and tandem mass spectrometry reveals evidence for a cell passage induced in-frame deletion in the spike glycoprotein that removes the furin-like cleavage site. *bioRxiv*, 1(1): 1-39. <https://doi.org/10.1101/2020.03.22.002204>
- Gao, J., Tian, Z., & Yang, X. (2020). Breakthrough: Chloroquine phosphate has shown apparent efficacy in treatment of COVID-19 associated pneumonia in clinical studies. *Biosci Trends*, 14(1): 72-73. <https://doi.org/10.5582/bst.2020.01047>
- Gautret, P., Lagier, J. C., Parola, P., Hoang, V. T., Meddeb, L., Mailhe, M., Doudier, B., Courjon, J., Giordanengo, V., Vieira, V. E., Dupont, H. T., Honore, S., Colson, P., Chabriere, E., La Scola, B., Rolain, J. M., Brouqui, P., & Raoult, D. (2020). Hydroxychloroquine and azithromycin as a treatment of COVID-19: results of an open-label non-randomized clinical trial. *Int J Antimicrob Agents*, 56: 105949-105955. <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2020.105949>
- Giri, R., Bhardwaj, T., Shegane, M., Gehi, B. R., Kumar, P., Gadhawe, K., Oldfield, C. J., & Uversky, V. N. (2020). Dark Proteome of Newly Emerged SARS-CoV-2 in Comparison with Human and Bat Coronaviruses. *bioRxiv*, 1(1): 1-59. <https://doi.org/10.1101/2020.03.13.990598>
- Grenga L, G. F., Pible O, Gaillard JC, Gouveia D, et al (2020). Shotgun proteomics of SARS-CoV-2 infected cells and its application to the optimisation of whole viral particle

- antigen production for vaccines. *bioRxiv*, 1(1): 1-18. <https://doi.org/10.1101/2020.04.17.046193>
- Gurwitz, D. (2020). Angiotensin receptor blockers as tentative SARS-CoV-2 therapeutics. *Drug Dev Res*, 1(1), 1-4. <https://doi.org/10.1002/ddr.21656>
- Han, H., Yang, L., Liu, R., Liu, F., Wu, K. L., Li, J., Liu, X. H., & Zhu, C. L. (2020). Prominent changes in blood coagulation of patients with SARS-CoV-2 infection. *Clin Chem Lab Med*, 1(1): 1-5. <https://doi.org/10.1515/cclm-2020-0188>
- Jiang, X., Rayner, S., & Luo, M. H. (2020). Does SARS-CoV-2 has a longer incubation period than SARS and MERS? *J Med Virol*, 92(5), 476-478. <https://doi.org/10.1002/jmv.25708>
- Lai, A., Bergna, A., Acciarri, C., Galli, M., & Zehender, G. (2020). Early phylogenetic estimate of the effective reproduction number of SARS-CoV-2. *J Med Virol*, 92(1): 675-679. <https://doi.org/10.1002/jmv.25723>
- Lai, C. C., Shih, T. P., Ko, W. C., Tang, H. J., & Hsueh, P. R. (2020). Severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) and coronavirus disease-2019 (COVID-19): The epidemic and the challenges. *Int J Antimicrob Agents*, 55(3): 105924-105933. <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2020.105924>
- Leng, L., Ma, J., Zhang, L., Li, W., Zhao, L., Zhu, Y., Wu, Z., Cao, R., & Zhong, W. (2020). Potential microenvironment of SARS-CoV-2 infection in airway epithelial cells revealed by Human Protein Atlas database analysis. *bioRxiv*, 1(1): 1-16. <https://doi.org/10.1101/2020.04.16.045799>
- Li, J., Guo, M., Tian, X., Liu, C., Wang, X., Yang, X., Wu, P., Xiao, Z., Qu, Y., Yin, Y., Fu, J., Zhu, Z., Liu, Z., Peng, C., Zhu, T., & Liang, Q. (2020). Virus-host interactome and proteomic survey of PMBCs from COVID-19 patients reveal potential virulence factors influencing SARS-CoV-2 pathogenesis. *bioRxiv*, 1(1): 1-19. <https://doi.org/10.1101/2020.03.31.019216>
- Lokman, S. M., Rasheduzzaman, M., Salauddin, A., Barua, R., Tanzina, A. Y., Rumi, M. H., Hossain, M. I., Siddiki, A. Z., Mannan, A., & Hasan, M. M. (2020). Exploring the genomic and proteomic variations of SARS-CoV-2 spike glycoprotein: a computational biology approach. *bioRxiv*, 1(1): 1-26. <https://doi.org/10.1101/2020.04.07.030924>
- Rice GI, D. T., PJ Grant, AJ Turner and NM Hooper. (2004). Evaluation of angiotensin-converting enzyme (ACE), its homologue ACE2 and neprilysin in angiotensin peptide metabolism. *Biochem. J.*, 83: 45-51.
- Tang X, W. C., Li X, Song Y, Yao X, Wu X, Duan Y, Zhang H, YWang Y, Qian Z, Cui J, and Lu J. (2020). On the origin and continuing evolution of SARS-CoV-2. *National Science Review*, 7(6): 1-11. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa036/5775463>
- Wang, H., Hou, X., Wu, X., Liang, T., Zhang, X., Wang, D., Teng, F., Dai, J., Duan, H., Guo, S., Li, Y., & Yu, X. (2020). SARS-CoV-2 proteome microarray for interactions at amino acid resolution. *bioRxiv*, 1(1): 1-19. <https://doi.org/10.1101/2020.03.26.994756>

- Wang, Y., Kang, H., Liu, X., & Tong, Z. (2020). Combination of RT-qPCR testing and clinical features for diagnosis of COVID-19 facilitates management of SARS-CoV-2 outbreak. *J Med Virol*, 92(1): 538-539. <https://doi.org/10.1002/jmv.25721>
- Wu, D., Wu, T., Liu, Q., & Yang, Z. (2020). The SARS-CoV-2 outbreak: What we know. *Int J Infect Dis*, 94(1): 44-48. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2020.03.004>
- Yao, X., Ye, F., Zhang, M., Cui, C., Huang, B., Niu, P., Liu, X., Zhao, L., Dong, E., Song, C., Zhan, S., Lu, R., Li, H., Tan, W., & Liu, D. (2020). In Vitro Antiviral Activity and Projection of Optimized Dosing Design of Hydroxychloroquine for the Treatment of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 (SARS-CoV-2). *Clin Infect Dis*, 71(15): 732-739. <https://doi.org/10.1093/cid/ciaa237>
- Zhang, H., Penninger, J. M., Li, Y., Zhong, N., & Slutsky, A. S. (2020). Angiotensin-converting enzyme 2 (ACE2) as a SARS-CoV-2 receptor: molecular mechanisms and potential therapeutic target. *Intensive Care Med*, 46(4): 586-590. <https://doi.org/10.1007/s00134-020-05985-9>
- Zhang X, D. X., Wang D, Lu M, Hou X, Wang H, Liang T, Dai J, Duan H, Xu Y, Li Y, Yu X. (2020). Proteome-wide analysis of differentially-expressed SARS-CoV-2 antibodies in early COVID-19 infection. *MedRxiv*, 1(1): 1-20. <https://doi.org/10.1101/2020.04.14.20064535.this>
- Zhao, J., Yuan, Q., Wang, H., Liu, W., Liao, X., Su, Y., Wang, X., Yuan, J., Li, T., Li, J., Qian, S., Hong, C., Wang, F., Liu, Y., Wang, Z., He, Q., Li, Z., He, B., Zhang, T., . . . Zhang, Z. (2020). Antibody responses to SARS-CoV-2 in patients of novel coronavirus disease 2019. *Clin Infect Dis*, 1(1): 1-22. <https://doi.org/10.1093/cid/ciaa344>

Hibridación en los procesos de soldadura: Una revisión

Hybridization in Welding Processes: A Review

Violeta Jasivy Campos-Hernández¹, Marco Arturo García-Rentería¹, Víctor Hugo López-Morelos².

¹ *Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Metalurgia, Carretera 57 Km. 5, CP. 25720 Monclova Coahuila, México.*

² *Instituto de investigación en Metalurgia y Materiales, Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, Edificio "U" Ciudad Universitaria CP. 58030, Morelia Michoacán México.*

Correspondencia para autor: Violeta Jasivy Campos Hernández

Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Metalurgia.

violeta.campos@uadec.edu.mx

Resumen:

La soldadura híbrida combina dos procesos de soldadura para ampliar las capacidades con una amplia gama de aplicaciones. Las limitaciones del proceso de soldadura individual se convierten en ventajas cuando se combina con un proceso de soldadura secundario, como resultado de la hibridación, por lo que los procesos de soldadura híbridos se consideran una solución efectiva con ventajas significativas sobre el proceso de soldadura simple convencional. Esta revisión presenta una descripción general de los diferentes enfoques de soldadura híbrida. Se analizan diferentes enfoques de este proceso, como la soldadura híbrida basada en láser y por arco-arco, revelando cómo la convergencia de diferentes tipos de arcos eléctricos abre nuevas posibilidades en términos de penetración, control térmico y calidad de la soldadura.

Palabras clave: Soldadura, soldadura hibrida, arco eléctrico, láser.

Abstract:

Hybrid welding combines two welding processes to expand capabilities across a wide range of applications. Limitations of individual welding processes turn into advantages when combined with a secondary welding process, making hybrid welding methods highly effective with significant advantages over conventional single-process welding. This review summarizes various hybrid welding approaches. Diverse hybrid welding methods, such as laser-based hybrid welding and arc-arc hybrid welding, are examined, revealing how the convergence of different types of electric arcs opens new possibilities in terms of penetration, thermal control, and welding quality.

Keywords: Welding, hybrid welding, electric arc, laser.

1. Introducción

1.1 El proceso de soldadura por fusión

La soldadura por fusión es un proceso que consiste en unir dos o más materiales calentándolos hasta su punto de fusión y uniéndolos (Zhang y col., 2020). Este proceso puede realizarse con o sin la adición de material de aporte, dependiendo del proceso de soldadura específico utilizado (Singh y col., 2021). La Sociedad Americana de Soldadura (AWS) define la fusión, como "la unión del metal de aportación y el metal base (sustrato), o del metal base únicamente, que da lugar a la coalescencia"(Muñoz y col., 2021). Este proceso es de gran importancia en la industria manufacturera, ya que permite crear uniones fuertes y duraderas, su capacidad para unir diferentes tipos de materiales y su versatilidad hacen de él una herramienta indispensable en la producción industrial moderna (Yang y col., 2021). Es el proceso tecnológico más común para unir materiales metálicos. Entre el 85% y el 90% de todas las estructuras metálicas soldadas se obtienen mediante soldadura por fusión (Kuryntsev, 2021).

Existen diversos tipos de procesos de soldadura por fusión, cada uno con sus propias características y aplicaciones únicas.

1.2 Soldadura por arco eléctrico

Este proceso utiliza la energía producida por el arco eléctrico para fundir y unir metales (Asibeluo y col., 2015). La soldadura por arco eléctrico consiste en crear un circuito eléctrico entre un electrodo y la pieza de trabajo, generando un calor intenso que funde el metal y permite la formación de una unión soldada resistente (Messler Jr, 2008). La historia de la soldadura por arco se remonta a finales del siglo XIX. La primera patente estadounidense de un proceso de soldadura por arco con electrodo metálico se concedió a C.L. Coffin, de Detroit, en 1890 (Rathod, 2021). Hoy en día, existen varios tipos de técnicas de soldadura por arco, cada una con características

y ventajas únicas. Algunos de los tipos más comunes de este proceso de soldadura son: soldadura por arco metálico con gas (GMAW), soldadura por arco metálico protegido (SMAW), soldadura por arco de tungsteno con gas (GTAW), soldadura por arco sumergido (SAW), soldadura por arco de plasma (PAW) y soldadura por arco con núcleo (FCAW) (Favi y col., 2019).

Estos procesos de arco eléctrico siguen el mismo principio básico, pero varían sustancialmente en términos de técnicas y aplicaciones. SMAW, implica la utilización de electrodos consumibles con un revestimiento que proporciona protección gaseosa durante la soldadura. En contraste, GMAW, utiliza un alambre continuo como electrodo y un gas de protección para evitar la contaminación atmosférica. El proceso de soldadura SAW, se destaca por el uso de un flujo de polvo y un electrodo continuo sumergido en la piscina de fusión, lo que resulta en altas tasas de deposición. Por otro lado, GTAW, emplea un electrodo de tungsteno no consumible y gas de protección, brindando una mayor precisión y control, ideal para aplicaciones delicadas (Welding, 2022). PAW, utiliza un arco de plasma ionizado para fundir el metal, ofreciendo una alta densidad de corriente y capacidad para soldar materiales conductores y no conductores (Wu y col., 2014). Por último, FCAW, emplea un electrodo tubular con un núcleo lleno de polvo fundente, eliminando la necesidad de un gas de protección externo y permitiendo la soldadura en condiciones de viento (Mohamat y col., 2012).

Cada uno de estos procesos tiene sus propias ventajas y desventajas, lo que permite su selección en función de las necesidades específicas de la aplicación de soldadura.

1.3 Procesos de alta energía

Los procesos de soldadura de alta energía se refieren a aquellas técnicas de soldadura que concentran la energía necesaria para soldar en un área muy pequeña. Esto permite un bajo aporte térmico total, lo que lo convierte en un método

de soldadura eficaz (Elmer y col., 2009). Los procesos de soldadura de alta energía incluyen, la soldadura por haz de electrones (EBW) y la soldadura por láser (LBW).

EBW utiliza un haz de electrones altamente enfocado para fundir los materiales (Węglowski y col., 2016). En este método, un cañón de electrones emite un flujo controlado de electrones de alta velocidad, que se enfocan en un pequeño punto en la superficie de los materiales que se van a unir (Siddharth y col., 2020). Mientras que la soldadura por láser emplea un haz láser para lograr una unión fundida, la particularidad de la soldadura láser radica en la forma que utiliza para depositar la energía térmica en la superficie de la pieza. Si se trata de otros procesos, el calor se transmite a la pieza principalmente por conducción y convección (en soldadura por arco, por ejemplo). El principio aquí es calentar el material mediante la interacción de un rayo de radiación luminosa (láser) con el material (Dal y col., 2016).

Estos métodos ofrecen ventajas como una alta velocidad de soldadura, mínima distorsión y la capacidad de soldar materiales de espesor variable. Además, estos procesos permiten la soldadura de materiales difíciles de unir utilizando métodos convencionales, lo que los convierte en herramientas esenciales en la industria aeroespacial y en la fabricación de dispositivos electrónicos de alta precisión (Węglowski y col., 2016) (Siddharth y col., 2020) (Dal y col., 2016).

1.4 Soldadura con gas

La soldadura con gas es un proceso que consiste en quemar un combustible gaseoso, normalmente acetileno, con oxígeno para generar calor suficiente para fundir parcialmente elementos metálicos y unirlos (Kou, 2020). Es una de las formas más antiguas de soldadura por calor y sus orígenes se remontan al siglo XIX (Weman, 2011), además, este método también se puede utilizar para cortar varios materiales. La soldadura con gas utiliza un gas protector como el argón para proteger el baño de soldadura de la contaminación exterior y puede llevarse a cabo

con o sin el uso de un material de relleno, dependiendo de los requisitos específicos de la aplicación. El gas y el oxígeno deben mezclarse en las proporciones correctas requeridas y el soplete se puede ajustar para producir el tipo de llama requerido para el metal que se está soldando o cortando. Este tipo de proceso de soldadura se utiliza comúnmente en trabajos de construcción en industrias de pequeña escala (Singh, Kumar, y col., 2021).

1.5 Soldadura en estado sólido

Las técnicas de soldadura tradicionales requieren generación de calor para fundir y fusionar materiales por medios externos como gas, electricidad o productos químicos. La soldadura por fricción es un proceso de soldadura de estado sólido que no implica la fusión completa de las superficies metálicas en la unión. Este proceso involucra dos superficies en contacto sometidas a un movimiento relativo generando calor mediante fricción mecánica (Kumar Rajak y col., 2020). Esta fricción genera calor en las superficies de las piezas, lo que conduce a su fusión y a la creación de una unión sólida cuando se enfrían y solidifican. Sin embargo la temperatura nunca excede el límite de fusión de material de la pieza de trabajo (Singh y col., 2016). Uno de los aspectos más destacados de la soldadura por fricción es su capacidad para unir materiales disímiles, incluyendo aleaciones metálicas y materiales compuestos (Martinsen y col., 2015).

2. Soldadura híbrida

La soldadura híbrida es un concepto de combinación de dos o más procesos de soldadura para obtener los beneficios de cada proceso y ampliar las capacidades que estaban restringidas con los mismos procesos individuales (Gullino y col., 2019). La soldadura híbrida puede aportar ventajas como una mayor estabilidad del proceso, excelente forma del cordón de soldadura, mayor productividad, propiedades mejoradas de la unión, bajo aporte de calor térmico, baja distorsión, capacidades mejoradas de configuración de la unión, entre otras (Churiaque y col.,

2019). Se han desarrollado diferentes enfoques de la soldadura híbrida, como la soldadura híbrida láser-arco y la soldadura híbrida arco-arco, con el fin de aumentar la capacidad de los procesos de soldadura para diferentes aplicaciones (Gumenyuk y col., 2013).

En la soldadura híbrida, uno de los procesos actúa como principal, mientras que uno secundario complementa las restricciones del proceso individual y, a su vez, obtienen los beneficios mencionados (Petring, 2010). La soldadura híbrida es una técnica versátil que permite unir una amplia gama de materiales. Puede aplicarse con éxito en materiales como acero inoxidable, aleaciones de aluminio, titanio, níquel y sus aleaciones, cobre y sus aleaciones, así como acero al carbono y materiales disímiles (Mehta, 2017).

3. Soldadura híbrida basada en láser

En la última década, la tecnología de soldadura láser ha supuesto un cambio considerable en el campo de la fabricación de muchos sectores industriales. En el caso de estos procesos, el láser se combina con un proceso de soldadura secundario con el fin de obtener diferentes ventajas tales como: alta densidad de energía y baja carga térmica, alta velocidad de soldadura, penetración profunda y alta resistencia a la tracción, buena capacidad para lograr separaciones de las piezas y la posibilidad de añadir metal de aportación y modificar la microestructura del metal, también es posible soldar mayores espesores de pared en una sola pasada, lo que proporciona beneficios económicos (Kah y col., 2012).

3.1 Arco- láser

En el proceso de soldadura por arco-láser híbrido, el rayo láser y el arco eléctrico interactúan en un solo baño de soldadura (Figura 1) y su efecto sinérgico se utiliza para producir una soldadura profunda y estrecha con una mayor tasa de producción (Shenghai y col., 2013) (Atabaki y col., 2014). La soldadura láser ha ganado gran reputación debido a su capacidad para producir un baño de soldadura estrecho y

profundo, ya que el rayo láser puede enfocarse en un área muy pequeña. El estrecho enfoque del haz permite una mayor velocidad de soldadura, lo que a su vez reduce la entrada de calor y las posibilidades de distorsión térmica en las piezas soldadas (Steen y col., 2010). Sin embargo, los sistemas de soldadura láser son más costosos y en cuestiones de eficiencia eléctrica es muy baja para la mayoría de los sistemas láser utilizados para soldar. Este tipo de soldadura tiene poca capacidad de superar separaciones de las piezas y, por lo tanto, requiere una alta precisión en el ajuste de la pieza de trabajo y la preparación de los bordes, también es un proceso muy difícil para materiales altamente reflectantes como aluminio, cobre, oro, etc. No obstante, los procesos de soldadura por arco tienen una excelente capacidad lograr separaciones, alta eficiencia eléctrica y pueden soldar eficientemente una amplia variedad de materiales (Le Guen y col., 2011). Sin embargo, la baja densidad de energía durante la soldadura por arco hace que el proceso sea más lento, lo que induce una alta entrada de calor en la zona de soldadura y da como resultado una distorsión térmica de la pieza soldada. La soldadura por arco y la soldadura láser, cuando se aplican en el mismo baño de soldadura, el efecto de hibridación compensa los inconvenientes de ambos procesos y complementa sus ventajas (Ascari y col., 2012).

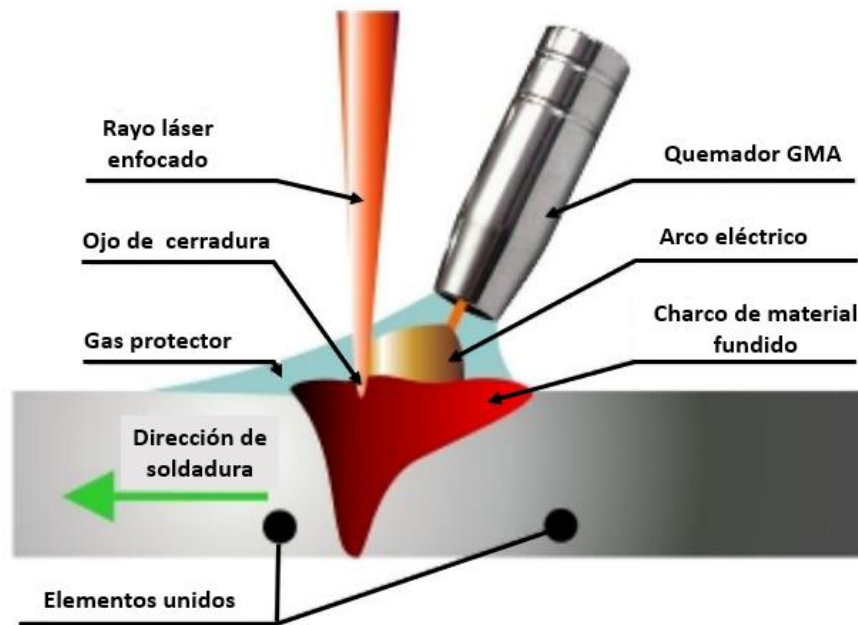


Figura 1. Esquema representativo del proceso de soldadura arco-láser. (Modificado de Acherjee (2018)).

Existen dos diferentes enfoques de usar láser junto con arco eléctrico para soldar. El primer enfoque se conoce como proceso de soldadura por arco asistido por láser, donde este se utiliza solamente para precalentar los metales que se van a soldar mediante el proceso de soldadura por arco (Mahrlé y col., 2013). En este proceso, se usa comúnmente una fuente de láser de baja potencia para aumentar el proceso de soldadura por arco y, por lo tanto, las mejoras en la penetración de la soldadura y la velocidad de soldadura no son significativas. En el segundo enfoque, se utiliza un rayo láser de alta potencia para realizar una soldadura de penetración profunda. Este es un proceso de soldadura de modo de penetración caracterizado por la formación de un ojo de cerradura en la unión (Liu y col., 2011; Casalino y col., 2014). En este proceso se utiliza para la soldadura la acción sinérgica de un rayo láser de alta densidad energética y un arco eléctrico de alta eficiencia energética (Zhang y col., 2015). Este proceso se conoce como proceso de soldadura láser aumentada

por arco, más comúnmente conocido como proceso híbrido de soldadura por arco láser (Steen y col., 1978).

Se han desarrollado distintos sistemas híbridos de soldadura por arco-láser basados en diferentes combinaciones de estos procesos. La soldadura por láser de CO₂ y Nd:YAG son los tipos más utilizados y GMAW, GTAW y PAW son los sistemas de soldadura por arco más utilizados, empleados en procesos de soldadura híbrida por arco-láser (Ishide y col., 2003; Piekarska y col., 2013; Gao y col., 2012).

3.1.1 Proceso GMAW-láser

En el proceso GMAW de láser híbrido, se utiliza un láser de CO₂, un láser Nd: YAG o un láser de fibra como fuente de calor primaria y el arco eléctrico producido durante la soldadura GMAW (Figura 2). En esta hibridación, el arco se genera entre el electrodo de metal consumible y la pieza de trabajo mientras es protegido con una atmósfera de gas y electrodo se alimenta continuamente desde un carrete. El láser genera un haz focalizado con forma de un ojo de cerradura en el baño de soldadura que asegura una soldadura de penetración profunda, mientras que el material de relleno fundido producido durante GMAW ayuda a llenar el espacio de la raíz y permite soldar las piezas con espacios más altos y problemas de ajuste (Nilsson y col., 2003). Se observa que la estabilidad del arco GMAW mejora cuando se combina con un haz láser (Pardal y col., 2019). El uso de materiales de relleno mejora la composición química de la soldadura mediante la adición de elementos de aleación en el baño de soldadura y también mejora las propiedades mecánicas de la soldadura (Li y col., 2011). Los gases de protección se utilizan para proteger el baño de soldadura fundido de la contaminación atmosférica. Los gases inertes como helio, argón o nitrógeno o mezclas de estos gases en diferentes proporciones se utilizan generalmente durante la soldadura GMAW (Kah y col., 2013). Una fuente de alimentación GMAW de modo pulsado se usa generalmente en GMAW de láser híbrido que permite un mejor control de la longitud del arco, la formación de gotas

de metal y su modo de transferencia, la estabilidad del arco y la formación de salpicaduras durante la soldadura (Liu y col., 2017).

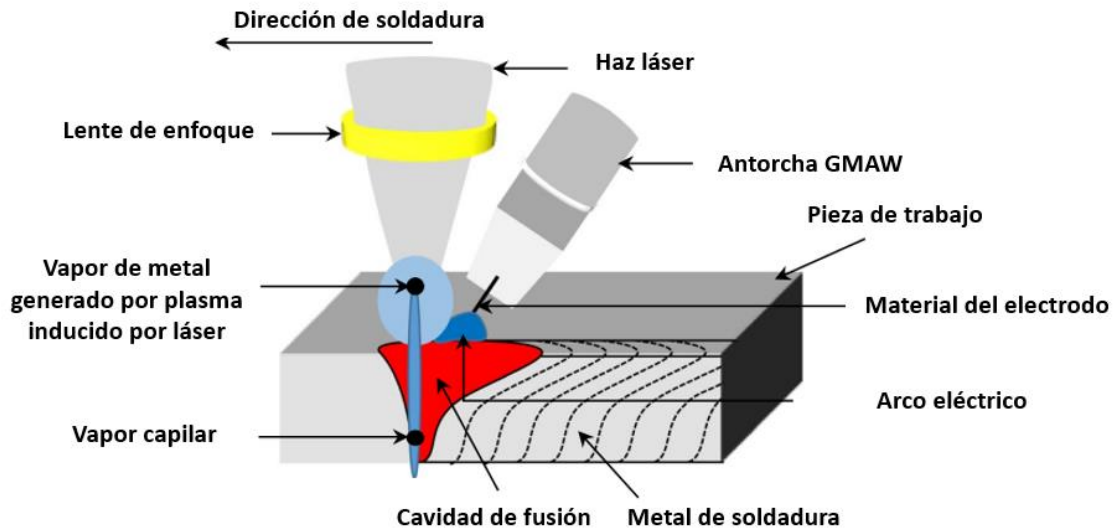


Figura 2. Proceso de soldadura híbrida GMAW-láser. (Modificado de Sharma y col. (2021)).

3.1.2 Proceso GTAW-láser

En el proceso de soldadura híbrida GTAW-láser, el arco eléctrico producido durante GTAW, se utiliza como fuente de calor secundaria (Figura 3). Debido al uso de electrodos de tungsteno no consumibles, es posible que se requieran materiales de relleno adicionales durante la soldadura. La tasa de depósito de metal durante el GTAW de láser híbrido es mucho menor que la del GMAW de láser híbrido, porque solo se usa una fracción del calor del arco para derretir el alambre de relleno durante el proceso de GTAW de láser híbrido. Como el alambre de relleno se separa del circuito eléctrico de la configuración GTAW-láser híbrido, la corriente de soldadura y la tasa de deposición de metal durante la soldadura se pueden determinar de forma independiente. Sin embargo, la contaminación del electrodo debido al vapor de metal caliente, la erosión de la punta del electrodo de tungsteno debido al uso

de encendido por arco de alta frecuencia y afinidad del tungsteno por el oxígeno son los problemas comunes asociados con el proceso GTAW (Seyffarth y col., 2002). Se utiliza gas protección para el baño de soldadura y también para proteger el electrodo de la contaminación atmosférica o la formación de óxido. La tasa de fusión del material base para GTAW-láser híbrido es casi el doble de la suma de la tasa de fusión de la soldadura láser y la soldadura GTAW, individualmente (Chen y col., 2017). Se informa que cuando se usa un arco GTAW con un haz láser en una zona de interacción común, la absorción de energía láser en el material base mejora debido al precalentamiento del material base usando el arco GTAW principal (Dilthey y col., 2002). Por otro lado, el uso de láser en el baño de soldadura común estabiliza el arco de GTAW. Debido a la alta densidad de potencia del haz láser, una parte del material base en la zona de soldadura se derrite y se vaporiza, lo que proporciona un camino conductor para el arco (Liu y col., 2013). Este sigue el camino conductor más corto entre el electrodo y el metal, por lo que se conecta a la zona de interacción del láser. El enraizamiento y el estrechamiento de la zona de interacción del arco con el láser aumenta la conductividad eléctrica a lo largo de la columna del arco y lo estabiliza (Indhu y col., 2018).

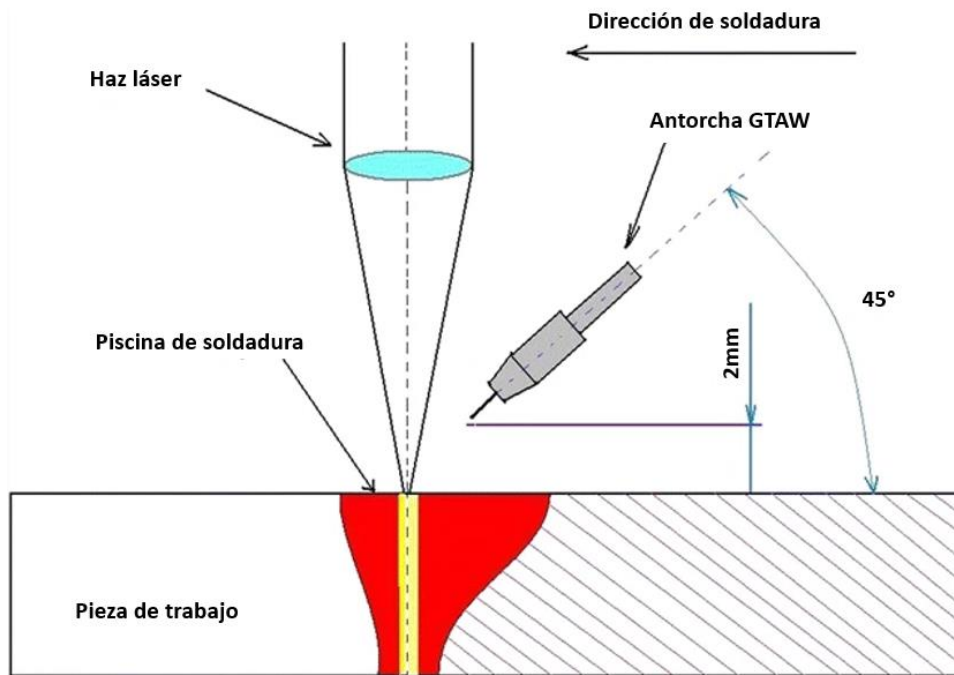


Figura 3. Proceso de soldadura híbrida GTAW-láser. (Modificado de Chatterjee y col. (2016)).

3.1.3 Proceso PAW-láser

En el proceso PAW de láser híbrido, se utiliza un arco de plasma restringido como fuente de calor secundaria (Figura 4). El electrodo de tungsteno no consumible utilizado en el proceso de soldadura PAW está integrado en la antorcha de soldadura. Una boquilla de constricción enfriada por agua de un pequeño diámetro se usa dentro de la antorcha de soldadura para comprimir el arco, lo que aumenta su intensidad y mejora la estabilidad y la forma del arco. El gas inerte que pasa a través de la boquilla de constricción, conocido como gas de orificio, se usa para producir plasma. El efecto de protección se mejora aún más mediante el uso de otro gas de protección, que pasa a través del anillo exterior de la antorcha. En PAW, el arco se establece entre el electrodo y la boquilla de constricción (arco sin transferencia) o entre el electrodo y el material de la pieza de trabajo (arco de

transferencia). En comparación con el arco de GTAW, el arco de plasma es más estable y puntiagudo, y el arco de plasma no se desvía fácilmente en el punto más cercano del metal base esto se debe a la acción del chorro debido a la constricción del arco de plasma. El efecto de hibridación del láser y el arco de plasma aumenta la velocidad de soldadura y estabiliza el arco de plasma. La profundidad de penetración es mayor para el proceso PAW láser híbrido que para la soldadura láser para la misma entrada de energía por unidad de longitud de la soldadura (Emmelmann y col., 2011). En comparación con los resultados del láser híbrido GTAW, la entrada de calor del arco se puede reducir hasta en un 40 % cuando se utiliza el láser híbrido PAW (Kim y col., 2011).

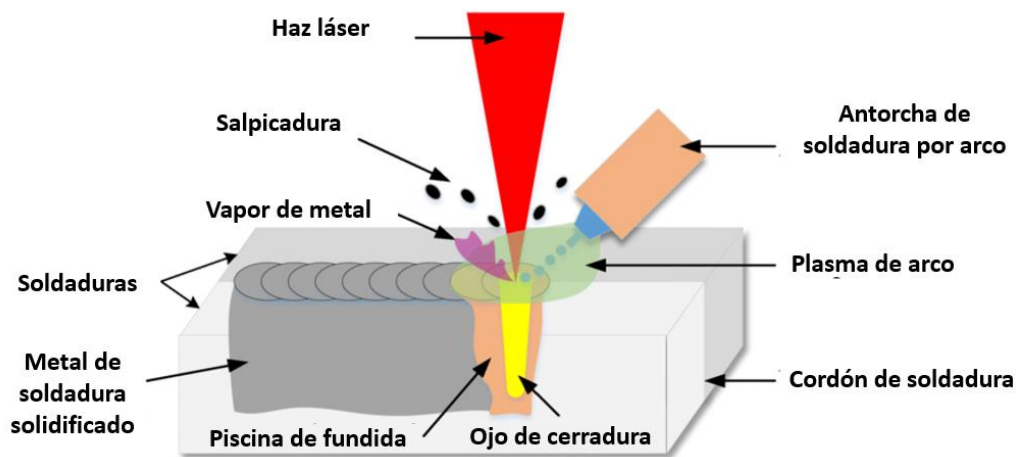


Figura 4. Soldadura híbrida PAW-láser. (Modificado de Fan y col. (2021)).

3.1.4 Proceso SAW-láser

La soldadura híbrida por arco sumergido combina fuentes de energía de soldadura por arco sumergido y soldadura láser para operar simultáneamente, como se muestra en la Figura 5. Este es un proceso potencial para la unión de acero de construcción de hasta 40 mm de espesor. En los métodos convencionales, la unión de espesores de orden tan elevado requiere varias capas de soldadura, una alta calidad de energía y alambres de relleno costosos, lo que puede provocar

distorsiones en la zona de unión. La soldadura por arco sumergido asistida por haz láser es capaz de unir espesores elevados, como 40 mm, en dos pasadas de soldadura. Como el SAW opera bajo el manto de fundente, la antorcha del SAW y el rayo láser deben separarse para que la energía láser haga contacto con la pieza de trabajo (Reisgen y col., 2012).

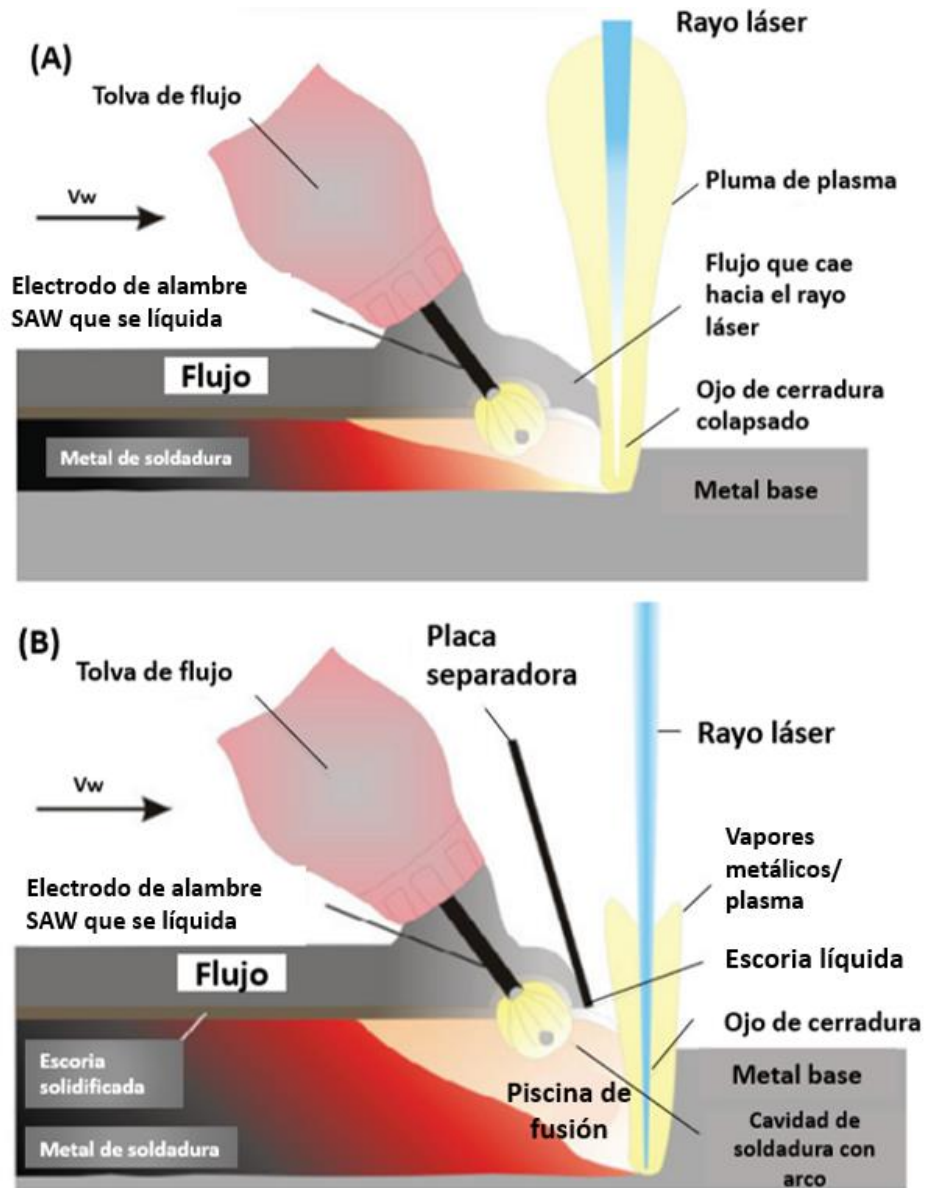


Figura 5. Soldadura híbrida SAW-Láser. (A) Sin placa separadora. (B) Con placa separadora. (Modificado de Reisgen y col. (2012)).

Por lo tanto, se utiliza una placa separadora, como se muestra en la Figura 5, entre las dos fuentes de energía del SAW y el láser, la cual separa el fundente del alcance efectivo del rayo láser para lograr una mejor penetración de soldadura con la energía láser. Esta técnica de unión es adecuada para la fabricación de acero

utilizado en la industria de tuberías, construcción de puentes y el sector de energía eólica (Reisgen y col., 2018).

4. Hibridación de los procesos de arco eléctrico

4.1 PAW-GMAW

La soldadura por arco híbrido Plasma-GMAW es un proceso novedoso que combina las ventajas de ambos métodos (Figura 6). El proceso combina las características de penetración profunda de arco plasma y la alta disposición de la soldadura GMAW (Miao y col., 2022). Ambos procesos tienen un comportamiento de arco diferente y funcionan bajo un ambiente protector gaseoso a una presión adecuada que los hace apropiados para trabajar juntos. El proceso combinado ofrece una alta velocidad de soldadura y un bajo aporte de calor. El sistema consta de una antorcha de plasma y GMAW, una fuente de energía de plasma, una fuente de energía GMAW y un servosistema para la alimentación de alambre (Van Anh y col., 2017).

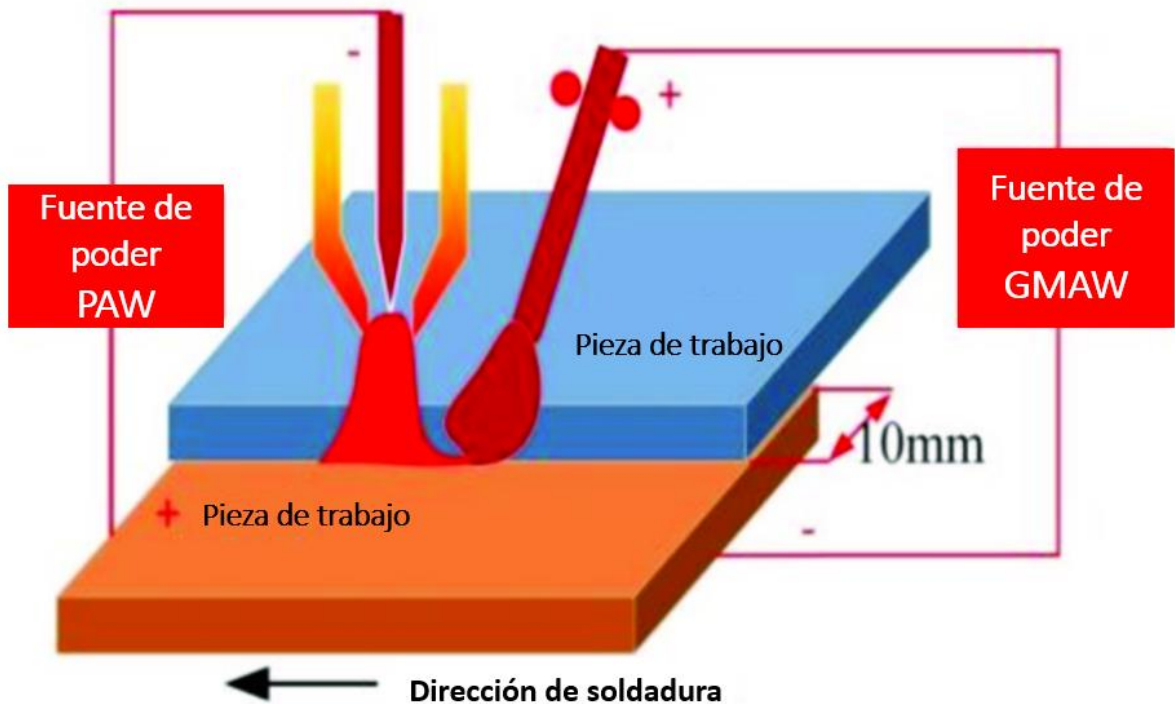


Figura 6. Proceso de soldadura híbrida PAW-GMAW. (Modificado de Zhang y col. (2023))

Tabla 1. Resultados de proceso híbrido PAW-GMAW.

Referencia	Material	Resultados
(Yang y col., 2020).	Aluminio 2219	Descubrieron que la corriente de plasma exterior ayudaba a aumentar la penetración de la soldadura mediante un aporte de calor adicional.
(Cai y col., 2018).	Aluminio 5083	Se logro una penetración de soldadura completa de 5 mm en placas de aluminio mediante el uso de soldadura por arco híbrido plasma-GMAW,
(Yang y col., 2016)	Aluminio 2219	Descubrieron que, al aumentar la corriente de plasma exterior, se mejoraba la estabilidad del arco híbrido,

		lo que ofrecía beneficios para mejorar la calidad de la soldadura en la soldadura híbrida plasma-GMAW.
--	--	--

4.2 GTAW-GMAW

GTAW es un proceso de soldadura que utiliza un electrodo de tungsteno no consumible. En condiciones correctas de soldadura, el electrodo de tungsteno no se funde, funciona creando un arco eléctrico entre el electrodo de tungsteno y la pieza de trabajo (Bhavsar y col, 2016). En este proceso, la soldadura se puede realizar con o sin metal de aportación. Cuando se utiliza metal de aporte, se añade directamente al baño fundido sumergiendo el extremo de una varilla de relleno en el borde principal del baño de soldadura fundido; cuando no se utiliza metal de aportación, los bordes del metal se calientan, se funden y fluyen juntos por sí mismos, y a medida que el metal fundido se enfría, se produce la coalescencia y las piezas se unen, lo que resulta en una soldadura que requiere un acabado mínimo (Lokesh y col., 2015) (Kumar y col., 2009). GTAW es adecuada para unir placas metálicas delgadas debido a su bajo nivel de penetración. Además, tiene una velocidad de soldadura lenta y una tasa de deposición baja, lo que es un desafío clave en las industrias de piezas de trabajo gruesas (Kutelu y col., 2018).

Por otro lado, GMAW utiliza un electrodo consumible que se alimenta continuamente y por lo general se combina un gas de protección inerte con algo de oxígeno para aumentar la estabilidad del arco. En este método, aunque normalmente la profundidad de penetración y la velocidad de soldadura son altas y no requieren una gran habilidad del operador, la apariencia y la calidad de la soldadura no son las adecuadas (Mvola y col., 2017).

La combinación de GTAW-GMAW como se muestra en la Figura 7, puede aprovechar las ventajas de los procesos individuales que a su vez eliminan las limitaciones (Shankara y col., 2021). El propósito de combinar estos arcos en la

soldadura híbrida es aumentar la estabilidad del arco GMAW (Ebrahimpour y col., 2023). La hibridación de estos procesos de arco eléctrico es un método impresionante para aumentar la productividad y la calidad de la soldadura debido a los beneficios que ofrecen ambos métodos. En el caso de GMAW el gas argón es deseable para la dureza del metal de soldadura a pesar de que el gas argón puro hace que el proceso sea inestable. Este problema de estabilidad del arco se puede solucionar integrando el proceso de soldadura GTAW (Shankara y col., 2021) (Agrawal y col., 2017).

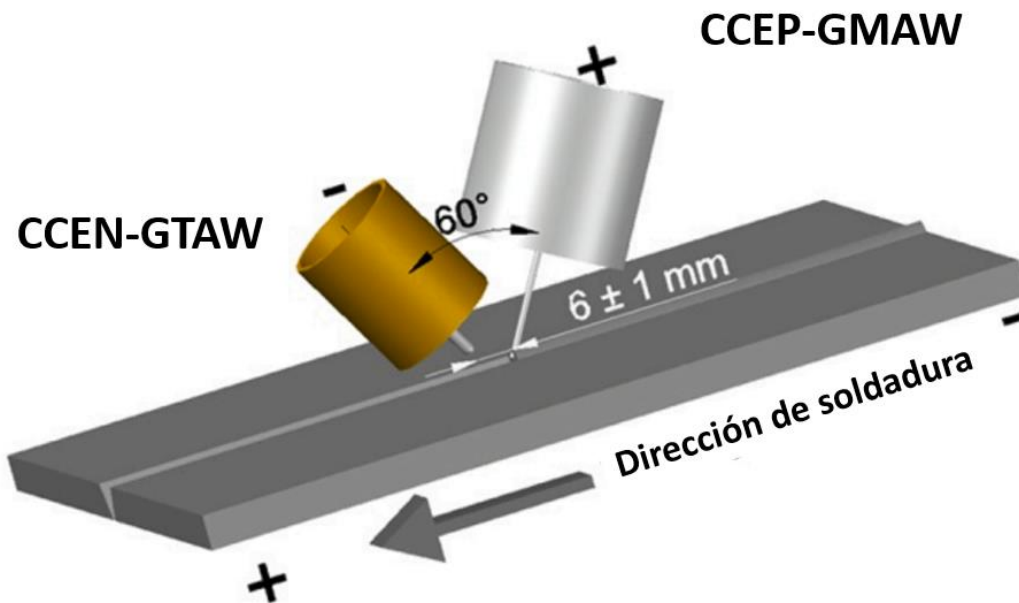


Figura 7. Proceso de soldadura híbrida GTAW-GMAW. Modificado de (Rodríguez-Hernández y col., 2020).

Tabla 2. Resultados del proceso híbrido GTAW-GMAW.

Referencia	Material	Propiedades consideradas	Resultados obtenidos
(Ismail y col., 2017)	Acero inoxidable 304 y acero dulce.	Porcentaje de reducción, porcentaje de elongación, límite elástico y de tracción.	Los resultados revelaron que el método híbrido es una posible alternativa a los métodos GTAW y GMAW individualmente. Además, en la mayoría de las ocasiones, para los parámetros establecidos se encontró que el proceso híbrido daba como resultado mejores propiedades mecánicas.
(Meng y col., 2014)	Placa de acero dulce	Resistencia a la tracción y microdureza.	Las propiedades consideradas fueron superiores a las de los procesos GTAW y GMAW individuales. La ZAC del proceso híbrido es más estrecha. La soldadura híbrida GTAW-GMAW puede aumentar la productividad en comparación con los procesos de soldadura convencionales, debido a que aumenta la profundidad de penetración de la soldadura, aumenta la velocidad y es capaz de controlar en ancho de la ZAC.
(Mishra y col., 2014)	Acero inoxidable de grados 202, 304, 310 y 316 con acero dulce.	Porcentaje de dilución de las juntas y resistencia a la tracción.	Se observó que las uniones de metales diferentes soldadas con el proceso híbrido tienen mejores propiedades físicas que las uniones soldadas con GMAW.
(Ebrahimpour y col., 2023)	Acero inoxidable dúplex 2205.	Profundidad y ancho de la soldadura, temperatura, microestructura.	Además de tener una muy buena apariencia, la soldadura híbrida también tiene la relación más alta entre la profundidad de soldadura y el ancho de soldadura. Además, por el efecto de usar dos arcos, en una misma entrada, tiene una temperatura máxima más baja en comparación con GMAW. El tiempo de enfriamiento promedio en la soldadura híbrida es menor que GMAW y mayor que GTAW,

		y esto ha provocado que la microestructura del metal de soldadura tenga cantidades aproximadamente iguales de ferrita y austenita (48 % de austenita).
--	--	--

4.3 SAW-GMAW

En esta hibridación se combinan los procesos de SAW con GMAW como se muestra en la Figura 8. Este concepto fue utilizado por primera vez para la fabricación en la construcción naval por Adaptive Intelligent Systems (Li y col., 2013). A este proceso también se le conoce como soldadura por arco de doble electrodo, en la que SAW es el arco principal y GMAW es el arco de relleno de derivación que conduce a extraer una corriente adicional alta con una mayor tasa de deposición para mantener una entrada de calor adecuada. El control de la corriente es necesario ya que SAW utiliza alta corriente que posteriormente causa una lata entrada de calor para crear una gran zona afectada por el calor (ZAC) y distorsión, que se puede controlar para obtener una geometría efectiva de cordón de soldadura con entrada de calor controlado (Shankara y col., 2021).

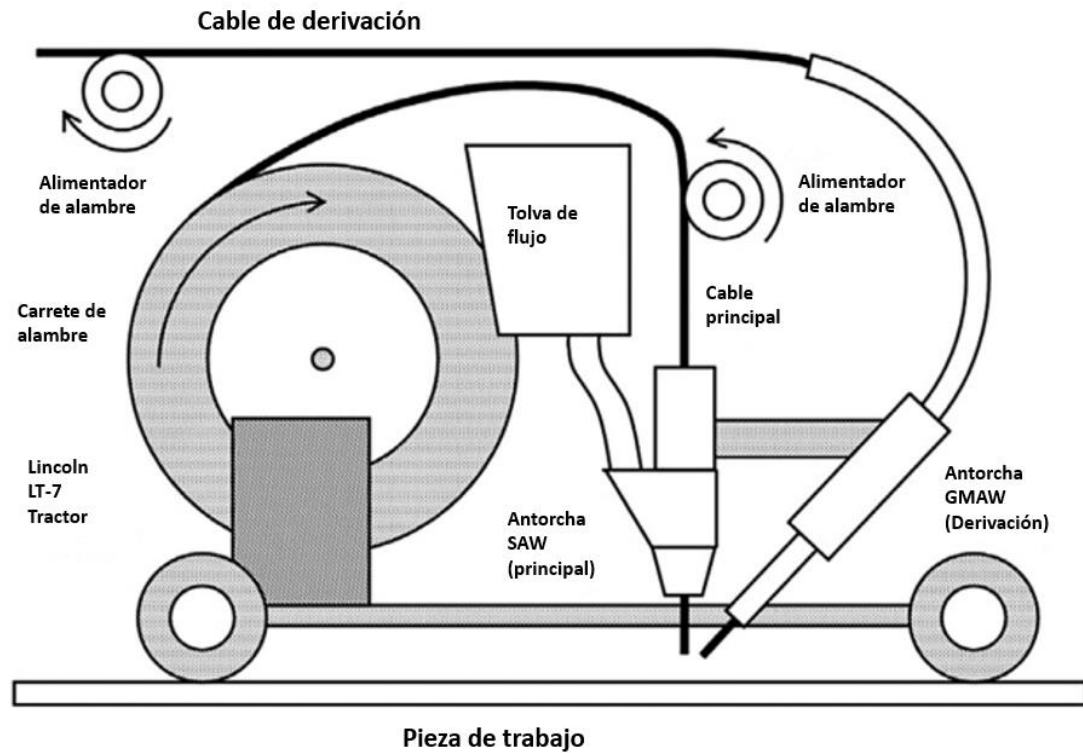


Figura 8. Soldadura híbrida SAW-GMAW. Modificado de (Lu y col., 2014).

Tabla 3. Resultados del proceso híbrido SAW-GMAW.

Referencia	Material	Resultados
(Sai Sandeep y col., 2022)	Acero inoxidable 316	El resultado muestra que la soldadura híbrida influye mucho en las propiedades mecánicas en comparación con las técnicas de soldadura individuales. Los valores de resistencia a la tracción y dureza de las uniones soldadas híbridas fueron altos en comparación con los de las uniones soldadas de múltiples pasadas debido a la combinación de características de los procesos de soldadura GMAW y SAW.
	Acero inoxidable 304	Una muestra soldada híbrida SAW-GMAW tiene la mayor resistencia a la tracción,

(Kumar y col., 2021)		resistencia a la flexión y alargamiento porcentual
----------------------	--	--

5. Discusiones

A lo largo de esta revisión se abordaron diferentes procesos de soldadura híbrida. Estas técnicas han demostrado numerosas ventajas que las hacen atractivas en diversas aplicaciones industriales. Una de las principales ventajas es su capacidad para lograr una alta calidad en las uniones soldadas, además, la fusión controlada de los materiales permite una penetración profunda y una distribución homogénea del calor, lo que resulta en soldaduras fuertes y duraderas.

Un aspecto crucial de estas técnicas es el papel del esclavo en el precalentamiento del material. El esclavo actúa como un precursor, preparando el material para el proceso de fusión, su función es crucial para asegurar una temperatura uniforme y adecuada en las piezas a unir, lo que contribuye significativamente a la integridad de la soldadura final. La capacidad de controlar el precalentamiento de manera precisa es esencial para evitar problemas como la distorsión excesiva o el agrietamiento durante el proceso de soldadura.

En cuanto a las características y calidad de las soldaduras obtenidas mediante estas técnicas, se destaca su alta precisión y capacidad para manejar una amplia variedad de materiales, incluyendo acero inoxidable, aluminio y aleaciones de titanio. Además, las propiedades mecánicas de las uniones soldadas suelen ser excelentes, con alta resistencia y resistencia a la fatiga. Esto las convierte en opciones ideales para aplicaciones que requieren un rendimiento mecánico confiable y duradero.

A pesar de sus numerosas ventajas, estas técnicas de soldadura híbrida basada en fusión también enfrentan desafíos y limitaciones. Uno de los problemas comunes es

la sensibilidad a las condiciones del material, como la presencia de impurezas o la variabilidad en la composición química. Además, la necesidad de mantener una precisión extrema en la configuración del proceso y en los parámetros de soldadura puede presentar desafíos en diferentes entornos industriales.

En resumen, los procesos de soldadura híbrida, tanto láser como de arco eléctrico, representan un avance significativo en la tecnología de unión. Sus ventajas en cuanto a calidad, precisión y versatilidad las convierten en técnicas prometedoras para diferentes aplicaciones industriales. Sin embargo, para aprovechar al máximo su potencial, es esencial abordar los desafíos asociados y seguir refinando los procesos para satisfacer las demandas cambiantes del mundo moderno de la soldadura industrial.

Conclusiones

Del trabajo realizado se obtienen las siguientes conclusiones tras el análisis de la información obtenida.

1. La hibridación de procesos de soldadura representa una evolución significativa en la industria de la unión de metales. A lo largo de esta revisión, se explora una amplia gama de técnicas y enfoques que ilustran cómo la combinación de procesos puede superar los desafíos tradicionales y llevar la soldadura a un nivel superior en términos de eficiencia, calidad y versatilidad.
2. En la hibridación de procesos de soldadura de alta energía con láser, se destaca cómo la convergencia de la tecnología láser con GMAW, GTAW, PAW y SAW ha permitido un control excepcional, velocidad mejorada y resultados de alta calidad.
3. Estas combinaciones han demostrado su valía en aplicaciones exigentes, incluyendo la soldadura de materiales avanzados y la fabricación de componentes críticos.

4. En cuanto a la hibridación entre procesos de arco eléctrico, se observó cómo estas combinaciones ofrecen una sinergia única. La profundidad de penetración y la velocidad de deposición se unen para lograr un equilibrio que es beneficioso en una variedad de aplicaciones industriales.
5. La hibridación en los procesos de soldadura es un campo en constante evolución que demuestra un gran potencial para la mejora continua de la industria de la soldadura.
6. Al combinar los puntos fuertes de diferentes técnicas, se están superando los límites tradicionales y abriendo nuevas oportunidades en la fabricación.
7. A medida que la tecnología avanza y se exploran nuevas combinaciones, es seguro afirmar que la hibridación seguirá desempeñando un papel fundamental en la optimización de los procesos de unión y en la creación de soluciones innovadoras para una amplia gama de aplicaciones industriales.

Referencias

- Acherjee, B. (2018). Hybrid laser arc welding: State-of-art review. *Optics & Laser Technology*, 99: 60-71.
- Agrawal, N., Thakur, M., Raj, J., & Baghel, A. (2017). A review on TIG/MIG welded joints. *Int. J. Sci. Technol. Eng.*, 4: 65-71.
- Ascari, A., Fortunato, A., Orazi, L., & Campana, G. (2012). The influence of process parameters on porosity formation in hybrid LASER-GMA welding of AA6082 aluminum alloy. *Optics & Laser Technology*, 44(5): 1485-1490.
- Asibeluo, I., & Emifoniye, E. (2015). Effect of arc welding current on the mechanical properties of A36 carbon steel weld joints. *SSRG International Journal of Mechanical Engineering*, 2(9): 32-40.
- Atabaki, M. M., Nikodinovski, M., Chenier, P., Ma, J., Liu, W., & Kovacevic, R. (2014). Experimental and numerical investigations of hybrid laser arc welding of aluminum alloys in the thick T-joint configuration. *Optics & Laser Technology*, 59: 68-92.

- Bhavsar, A. N., & Patel, V. A. (2016). Influence of process parameters of TIG welding process on mechanical properties of SS304L welded joint. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 3(5): 977-981.
- Cai, D., Han, S., Zheng, S., Luo, Z., Zhang, Y., & Wang, K. (2018). Microstructure and corrosion resistance of Al5083 alloy hybrid plasma-MIG welds. *Journal of Materials Processing Technology*, 255: 530-535.
- Casalino, G., Mortello, M., Leo, P., Benyounis, K., & Olabi, A. (2014). Study on arc and laser powers in the hybrid welding of AA5754 Al-alloy. *Materials & Design*, 61: 191-198.
- Chatterjee, A., Kumar, S., Tewari, R., & Dey, G. K. (2016). Welding of Mo-based alloy using electron beam and laser-GTAW hybrid welding techniques. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47: 1143-1152.
- Chen, M., Xu, J., Xin, L., Zhao, Z., Wu, F., Ma, S., & Zhang, Y. (2017). Effect of keyhole characteristics on porosity formation during pulsed laser-GTA hybrid welding of AZ31B magnesium alloy. *Optics and Lasers in Engineering*, 93: 139-145.
- Churiaque, C., Chludzinski, M., Porrúa-Lara, M., Dominguez-Abecia, A., Abad-Fraga, F., & Sánchez-Amaya, J. M. (2019). Laser hybrid butt welding of large thickness naval steel. *Metals*, 9(1): 100.
- Dal, M., & Fabbro, R. (2016). An overview of the state of art in laser welding simulation. *Optics & Laser Technology*, 78: 2-14.
- Dilthey, U., & Wiesschemann, A. (2002). Perspectives offered by combining a laser beam with arc welding procedures. *Welding international*, 16(9): 711-719.
- Ebrahimpour, A., Salami, S., & Saeid, T. (2023). Experimental and finite element investigation on hybrid GTAW-GMAW of duplex stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 125(3-4): 1543-1557.

- Elmer, J., Hochanadel, P., Lachenberg, K., & Webber, T. (2009). *Introduction to high energy density electron and laser beam welding*. No. LLNL-BOOK-417590: 3-14.
- Emmelmann, C., Kirchhoff, M., & Petri, N. (2011). Development of plasma-laser-hybrid welding process. *Physics Procedia*, 12: 194-200.
- Fan, X. a., Gao, X., Liu, G., Ma, N., & Zhang, Y. (2021). Research and prospect of welding monitoring technology based on machine vision. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115: 3365-3391.
- Favi, C., Campi, F., & Germani, M. (2019). Comparative life cycle assessment of metal arc welding technologies by using engineering design documentation. *The international journal of life cycle assessment*, 24: 2140-2172.
- Gao, M., Mei, S., Wang, Z., Li, X., & Zeng, X. (2012). Process and joint characterizations of laser-MIG hybrid welding of AZ31 magnesium alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(6): 1338-1346.
- Gullino, A., Matteis, P., & D'Aiuto, F. (2019). Review of aluminum-to-steel welding technologies for car-body applications. *Metals*, 9(3): 315.
- Gumenyuk, A., & Rethmeier, M. (2013). Developments in hybrid laser-arc welding technology. *In Handbook of laser welding technologies*, 19: 505-521.
- Indhu, R., Soundarapandian, S., & Vijayaraghavan, L. (2018). Yb: YAG laser welding of dual phase steel to aluminium alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 262: 411-421.
- Ishide, T., Tsubota, S., & Watanabe, M. (2003). Latest MIG, TIG arc-YAG laser hybrid welding systems for various welding products. *First International Symposium on High-Power Laser Macroprocessing*, 4831: 347-354.
- Ismail, A. A., Fuhaid, M. S., & Murali, R. (2017). *A International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 5: 114-117.
- Kah, P., & Martikainen, J. (2012). Current trends in welding processes and materials: improve in effectiveness. *Review on advanced materials Science*, 30(2): 189-200.

- Kah, P., & Martikainen, J. (2013). Influence of shielding gases in the welding of metals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64: 1411-1421.
- Kim, C., Ahn, Y., & Kim, J. (2011). CO₂ laser-micro plasma arc hybrid welding for galvanized steel sheets. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21: s47-s53.
- Kou, S. (2020). *Welding metallurgy*. (Tercera edición). University of Wisconsin: John Wiley & Sons. 374 Pp.
- Kumar, A., & Sundarrajan, S. (2009). Effect of welding parameters on mechanical properties and optimization of pulsed TIG welding of Al-Mg-Si alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 42: 118-125.
- Kumar, G. V., Ganesh, P. S., Pandey, A., Bharath, G. S., & Kumar, K. V. (2021). Studies on Stainless Steel 304 Samples Joined by Submerged Arc Welding, MIG Welding and Hybrid Welding. IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, 1185: 12-24.
- Kumar Rajak, D., Pagar, D. D., Menezes, P. L., & Eyvazian, A. (2020). Friction-based welding processes: friction welding and friction stir welding. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 34(24): 2613-2637.
- Kuryntsev, S. (2021). A review: Laser welding of dissimilar materials (Al/Fe, Al/Ti, Al/Cu)—Methods and techniques, microstructure and properties. *Materials*, 15(1): 122.
- Kutelu, B. J., Seidu, S. O., Eghabor, G. I., & Ibitoye, A. I. (2018). Review of GTAW welding parameters. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 6(5): 541-554.
- Le Guen, E., Fabbro, R., Carin, M., Coste, F., & Le Masson, P. (2011). Analysis of hybrid Nd:Yag laser-MAG arc welding processes. *Optics & Laser Technology*, 43(7): 1155-1166.

- Li, R., Li, Z., Zhu, Y., & Rong, L. (2011). A comparative study of laser beam welding and laser–MIG hybrid welding of Ti–Al–Zr–Fe titanium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 528(3): 1138-1142.
- Li, X., Zhang, Y., & Kvidahl, L. (2013). Penetration depth monitoring and control in submerged arc welding. *Weld J*, 92(2): 48s-56s.
- Liu, L., & Chen, M. (2011). Interactions between laser and arc plasma during laser–arc hybrid welding of magnesium alloy. *Optics and Lasers in Engineering*, 49(9-10): 1224-1231.
- Liu, L., Chen, M., & Li, C. (2013). Effect of electric arc on laser keyhole behavior based on direct observation during low power pulsed laser–arc hybrid welding process. *Optics and Lasers in Engineering*, 51(10): 1153-1160.
- Liu, S., Chen, S., Wang, Q., Li, Y., Zhang, H., & Ding, H. (2017). Analysis of plasma characteristics and conductive mechanism of laser assisted pulsed arc welding. *Optics and Lasers in Engineering*, 92: 39-47.
- Lokesh, K., Karthikeyan, P., Narasimma, R., Prasanna, B., & George, O. (2015). Microstructure and Mechanical Properties of ASS (304)-FSS (430) Dissimilar Joints in IN SMAW and GTAW Process. *International Journal of Engineering Sciences and Research Technology*, 6: 367-378.
- Lu, Y., Chen, S., Shi, Y., Li, X., Chen, J., Kvidahl, L., & Zhang, Y. M. (2014). Double-electrode arc welding process: principle, variants, control and developments. *Journal of Manufacturing Processes*, 16(1): 93-108.
- Mahrle, A., Rose, S., Schnick, M., Beyer, E., & Füssel, U. (2013). Laser-assisted plasma arc welding of stainless steel. *Journal of Laser Applications*, 25(3). [En línea] Disponible en: <https://doi.org/10.2351/1.4798338>.
- Martinsen, K., Hu, S., & Carlson, B. (2015). Joining of dissimilar materials. *Cirp Annals*, 64(2): 679-699.
- Mehta, K. (2017). Advanced joining and welding techniques: an overview. *Advanced Manufacturing Technologies: Modern Machining, Advanced Joining, Sustainable Manufacturing*, 101-136.

- Meng, X., Qin, G., Zhang, Y., Fu, B., & Zou, Z. (2014). High speed TIG–MAG hybrid arc welding of mild steel plate. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(11): 2417-2424.
- Messler Jr, R. W. (2008). *Principles of welding: processes, physics, chemistry, and metallurgy*. John Wiley & Sons. 1(2): 3-40.
- Miao, Y., Wang, Z., Liu, J., Wu, Y., Zhao, Y., & Li, C. (2022). Effects of bypass-current and outer plasma current on the arc stability and melt pool behaviors during plasma-MIG hybrid arc welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 82: 415-424.
- Mishra, R. R., Tiwari, V. K., & Rajesha, S. (2014). A study of tensile strength of MIG and TIG welded dissimilar joints of mild steel and stainless steel. *International Journal of Advances in Materials Science and Engineering*, 3(2): 23-32.
- Mohamat, S. A., Ibrahim, I. A., Amir, A., & Ghalib, A. (2012). The effect of flux core arc welding (FCAW) processes on different parameters. *Procedia Engineering*, 41: 1497-1501.
- Muñoz, M. Á. Z., Escoto, P. A. O., & Gordillo, G. B. (2021). Automated MIG Welding Application: An Industrial Case Study. *International Conference on Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering*, 627-635.
- Mvola, B., & Kah, P. (2017). Effects of shielding gas control: welded joint properties in GMAW process optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88: 2369-2387.
- Nilsson, K., Engström, H., Heimbs, S., & Kaplan, A. (2003). Parameter influence in CO₂-laser/MIG hybrid welding. *Annual assembly of International Institute of Welding*: 06/07/2003-10/07/2003. 2: 3-25.
- Pardal, G., Martina, F., & Williams, S. (2019). Laser stabilization of GMAW additive manufacturing of Ti-6Al-4V components. *Journal of Materials Processing Technology*, 272: 1-8.

- Petring, D. (2010). Enhancing laser welding capabilities by hybridisation or combination with other processes. *In Advances in Laser Materials Processing*, 10: 261-287.
- Piekarska, W., & Kubiak, M. (2013). Modeling of thermal phenomena in single laser beam and laser-arc hybrid welding processes using projection method. *Applied Mathematical Modelling*, 37(4): 2051-2062.
- Rathod, D. W. (2021). Comprehensive analysis of gas tungsten arc welding technique for Ni-base weld overlay. *Advanced welding and deforming*, 4:105-126.
- Reisgen, U., Olschok, S., & Engels, O. (2018). Laser beam submerged arc hybrid welding: A novel hybrid welding process. *Journal of Laser Applications*, 30(4): 2-8.
- Reisgen, U., Olschok, S., Jakobs, S., Schleser, M., Mokrov, O., & Rossiter, E. (2012). Laser beam submerged arc hybrid welding. *Physics Procedia*, 39: 75-83.
- Rodríguez-Hernández, T., Cruz-Hernández, V., García-Rentería, M., Torres-Gonzalez, R., García-Villarreal, S., Curiel-López, F., & Falcón-Franco, L. (2020). First assessment on the microstructure and mechanical properties of gtaw-gmaw hybrid welding of 6061-t6 AA. *Journal of manufacturing processes*, 59: 658-667.
- Sai Sandeep, S., Renuka, S., Sai Pavan, V., Hari, N., & Veeresh Kumar, G. (2022). Welding of Stainless Steel 316 Joined by Using Multipass SAW, MIG, and Hybrid (SAW and MIG) Welding. Conference of Innovative Product Design and Intelligent Manufacturing System, 177-186.
- Seyffarth, P., & Krivtsun, I. (2002). *Laser-arc processes and their applications in welding and material treatment*, 1:43-84.
- Shankara, S., Mehtab, K. P., Chattopadhyayaa, S., & Vilaçab, P. (2021). Hybrid welding technologies. *Advanced Welding and Deforming*, 9: 231.

- Sharma, A., Mohanty, U. K., Tanaka, M., & Suga, T. (2021). Mechanism of gap bridgeability in lap-fillet laser-arc hybrid welding. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 8(3): 355-371.
- Shenghai, Z., Yifu, S., & Huijuan, Q. (2013). The technology and welding joint properties of hybrid laser-tig welding on thick plate. *Optics & Laser Technology*, 48: 381-388.
- Siddharth, P., & Narayanan, C. S. (2020). A review on Electron Beam Welding process. *Journal of Physics: Conference Series*, 1706(1): 012-208
- Singh, R., Kumar, R., Feo, L., & Fraternali, F. (2016). Friction welding of dissimilar plastic/polymer materials with metal powder reinforcement for engineering applications. *Composites Part B: Engineering*, 101: 77-86.
- Singh, R. P., Dubey, S., Singh, A., & Kumar, S. (2021). A review paper on friction stir welding process. *Materials Today: Proceedings*, 38: 6-11.
- Singh, R. P., Kumar, S., Dubey, S., & Singh, A. (2021). A review on working and applications of oxy-acetylene gas welding. *Materials Today: Proceedings*, 38: 34-39.
- Steen, W., Eboo, M., & Clarke, J. (1978). Arc augmented laser welding of materials. *Advances in Welding Processes Proceedings*. 4th International Conference. Harrogate, UK,
- Steen, W. M., & Mazumder, J. (2010). *Laser material processing*. *springer science & business media*. 4: 199-229.
- Van Anh, N., Shinichi, T., Van, H. B., & Manabu, T. (2017). Development of plasma-MIG hybrid welding process. 35(2): 132s-136s.
- Węglowski, M. S., Błacha, S., & Phillips, A. (2016). Electron beam welding—Techniques and trends—Review. *Vacuum*, 130: 72-92.
- Welding, A. (2022). Types of Welding Processes. [En línea]. Disponible en: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/metals-what-are-metals/metal-joining-processes/welding/types-of-welding-processes/>.

- Weman, K. (2011). *Welding processes handbook*. (Segunda edición). Ed. Elsevier. 167 Pp.
- Wu, C., Wang, L., Ren, W., & Zhang, X. (2014). Plasma arc welding: Process, sensing, control and modeling. *Journal of manufacturing processes*, 16(1): 74-85.
- Yang, K., Wang, F., Duan, D., Zhang, T., Luo, C., Cressault, Y., Yu, Z., Yang, L., & Li, H. (2021). Experimental investigation of integrated circular triple-wire pulse GMAW of Q960E high-strength steel for construction machinery. *Materials*, 14(2): 375.
- Yang, T., Chen, L., Zhuang, Y., Liu, J., & Chen, W. (2020). Arcs interaction mechanism in Plasma-MIG hybrid welding of 2219 aluminium alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 56: 635-642.
- Yang, T., Xiong, J., & Chen, H. (2016). Effect of process parameters on tensile strength in plasma-MIG hybrid welding for 2219 aluminum alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84: 2413-2421.
- Zhang, H., He, W., Zheng, H., Yu, J., Zhang, H., Li, Y., Gao, J., & Su, Z. (2023). Plasma-Pulsed GMAW Hybrid Welding Process of 6061 Aluminum and Zinc-Coated Steel. *Crystals*, 13(5): 723.
- Zhang, L.-J., Ning, J., Zhang, X.-J., Zhang, G.-F., & Zhang, J.-X. (2015). Single pass hybrid laser-MIG welding of 4-mm thick copper without preheating. *Materials & Design*, 74: 1-18.
- Zhang, Y. M., Yang, Y.-P., Zhang, W., & Na, S.-J. (2020). Advanced welding manufacturing: a brief analysis and review of challenges and solutions. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142(11): 110816.

Aplicaciones Emergentes de Nanopartículas de ZnO en Procesos de Fotodegradación, Review.

Emerging Applications of ZnO Nanoparticles in Photodegradation Processes, Review.

Edson Edgardo Guipzot Sánchez¹, Víctor Hugo Martínez Landeros¹,
Luis Alfonso García Cerda², Sergio García Villarreal¹, Marco Arturo
García Rentería¹, Lázaro Abdiel Falcón Franco¹

¹ Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Metalurgia, Carr. 57, km. 5, C.P.
25710,

Monclova, Coahuila, México.

² Centro de Investigación en Química Aplicada, Blvd. Enrique Reyna Herosillo
#140, C.P. 25294, Saltillo, Coahuila, México.

Correspondencia para autor: Edson Edgardo Guipzot Sánchez.

Universidad Autónoma de Coahuila.

edson_guipzot@uadec.edu.mx

Resumen

Hasta el día de hoy, la preocupación por la contaminación ha alcanzado niveles alarmantes en todo el mundo. A pesar de los esfuerzos por implementar regulaciones ambientales más estrictas y promover prácticas sostenibles, los niveles de contaminación siguen en aumento. Las emisiones industriales, la deforestación, la agricultura intensiva y el uso excesivo de plásticos son solo algunas de las actividades humanas que contribuyen significativamente a este problema global. Estos factores han llevado a un deterioro continuo de la calidad del aire, agua y suelo en muchos lugares del mundo. Una de las alternativas que se ha puesto en práctica para contrarrestar este problema es el desarrollo de fotocatalizadores. Dentro de este campo de investigación el óxido de zinc (ZnO) ha cobrado relevancia gracias a su eficacia en procesos de fotodegradación, factores como alta actividad fotocatalítica, estabilidad química en condiciones ambientales, fácil manipulación, bajo costo y nula toxicidad, son unas de las propiedades físicas y estructurales que hacen tan llamativo este metal. El presente artículo de divulgación examina las ventajas y criterios de aplicar este compuesto en la mineralización de contaminantes orgánicos en sistemas acuosos, proceso que consiste en disminuir la concentración de compuestos nocivos contenidos en soluciones mediante reacciones fotodegradantes; contribuyendo así en la mejora de la calidad del agua y protección del medio ambiente. La degradación fotocatalítica constituye una técnica sostenible y sobre todo amigable con el entorno, que emplea la energía solar para descomponer contaminantes mediante reacciones químicas, transformándolos en compuestos menos perjudiciales. El ZnO se destaca por sus propiedades semiconductoras y su capacidad para generar pares de electrones y huecos cuando es irradiado con luz solar. Estos electrones y vacíos responden a los contaminantes existentes en el entorno, descomponiéndolos en sustancias que no representan riesgos.

Palabras clave. Fotocatálisis, nanopartículas, ZnO, mineralización, sustentabilidad.

Abstract

To this day, concern about pollution has reached alarming levels around the world. Despite efforts to implement stricter environmental regulations and promote sustainable practices, pollution levels continue to rise. Industrial emissions, deforestation, intensive agriculture and excessive use of plastics are just some of the human activities that contribute significantly to this global problem. These factors have led to a continuous deterioration of air, water and soil quality in many parts of the world. One of the alternatives that has been implemented to counteract this problem is the development of photocatalysts. Within this field of research, zinc oxide (ZnO) has gained relevance thanks to its effectiveness in photodegradation processes. Factors such as high photocatalytic activity, chemical stability in environmental conditions, easy handling, low cost and no toxicity are some of the physical and structural properties that make this metal so attractive. This article examines the advantages and criteria of applying this compound in the mineralization of organic pollutants in aqueous systems, a process that consists of reducing the concentration of harmful compounds contained in solutions by means of photodegradation reactions, thus contributing to the improvement of water quality and environmental protection. Photocatalytic degradation is a sustainable and, above all, environmentally friendly technique that uses solar energy to decompose pollutants through chemical reactions, transforming them into less harmful compounds. ZnO stands out for its semiconducting properties and its ability to generate electron-hole pairs when irradiated with sunlight. These electrons and vacancies respond to existing pollutants in the environment, decomposing them into substances that do not represent risks.

Keywords. Photocatalysis, nanoparticles, ZnO, mineralization, sustainability.

Introducción

Hasta la fecha, los contaminantes a base de compuestos orgánicos han emergido como la principal preocupación para el ser humano y la biodiversidad (Shanmugam y col., 2016); esto a raíz del rápido y desmedido crecimiento industrial, generando desechos vertidos en canales de agua como consecuencia de las actividades de la industria textil, alimentaria, petrolera y cosmética (Kumar y col., 2015 a), residuos los cuales son extremadamente nocivos, pudiendo causar daños severos en la salud de las personas que llegan a inhalarlos o beber de estos sitios contaminados (Chen y col., 2017).

Ante este problema, se han implementado técnicas que, al interactuar con las moléculas del tinte, rodamina B, naranja de metilo o azul de metileno, por mencionar algunos, pueden lograr descomponer o por lo menos, un decremento en la concentración de la sustancia nociva.

Los catalizadores biológicos, como las enzimas, son las que se encargan de regular toda interacción química en los organismos vivos, resaltando la gran importancia de los procesos catalíticos (Lacombe y col., 2012), sin embargo, las alternativas más empleadas para la purificación del agua pueden incluir principios de, adsorción, biodegradación, electrocoagulación, nanofiltración, cloración, ozonización y oxidación avanzada (Pawar y col., 2013); cada uno de ellos vienen ligados con ventajas y desventajas, estas últimas pudiendo originarse por el costoso equipo de trabajo, reactivos difíciles de manipular o simplemente dificultad al llevar estos procesos a escalas mayores. La fotocatalisis heterogénea sigue siendo una tecnología promisoría en cuestiones energéticas y medioambientales, ya que es económica con condiciones de manipulación cómoda y factible (Lacombe y col., 2012). Entre los fotocatalizadores a base de semiconductores, el ZnO se ha posicionado como el principal contendiente gracias a su ancho de banda energético, bajo costo y notable resistencia a las fluctuaciones de temperatura. Sin embargo, lo más crucial es su capacidad para captar una significativa porción del espectro solar, superando en este aspecto al dióxido de titanio (TiO₂) (Kannan y col., 2021).

Es bien sabido que el ZnO es un material luminiscente y es idóneo para emplear en

aplicaciones optoelectrónicas. Se trata de un semiconductor de la familia II-VI con un ancho de banda energética de aproximadamente 3.3 eV cuando se encuentra a temperatura ambiente, y además, es posible fabricar películas de ZnO que sean transparentes en todo el espectro visible de la luz (Caglar y col., 2009). Debido a estas características notables, el ZnO ha atraído una considerable atención en virtud de estas propiedades únicas y su adaptación en diversas áreas (Cheong y col., 2002). Entre las aplicaciones más destacadas se encuentran los detectores de humedad y gas, dispositivos fotoeléctricos y emisores de luz, varistores, dispositivos de ondas acústicas superficiales, láseres ultravioleta, guías de ondas ópticas, células fotovoltaicas, visualizadores y pantallas táctiles (Ramos y col., 2013).

1. Óxido de zinc

1.1 Generalidades

En la actualidad, la implementación de materiales nanoestructurales como el ZnO y TiO₂ (por mencionar algunos), muestran numerosas aplicaciones en ámbitos relacionados con la tecnología (Agustín, 2023).

El ZnO es un compuesto inorgánico que se encuentra relativamente en gran cantidad en la naturaleza, químicamente estable, sencillo de elaborar y no presenta riesgos tóxicos. Aunque no se disuelve en agua, puede disolverse en ácidos y bases débiles (Mosqueda, 2011). Cuenta con un punto de ebullición muy elevado, de 1975 °C (Rivera y col., 2021); tiene 5 isótopos estables, sin embargo los más comunes son el zinc 64 (48.89%), zinc 66 (27.81 %), y el zinc 68 (18.57%) mientras que el oxígeno se presenta casi únicamente en el isótopo de oxígeno 16 (99.76%) (Zaera, 2004).

El ZnO es un óxido metálico que forma parte de los materiales semiconductores. Estos óxidos son conocidos por su habilidad para desencadenar reacciones fotocatalíticas y actuar como agentes foto-oxidantes contra sustancias químicas y biológicas. Por lo tanto, este óxido metálico se destaca por su valor en aplicaciones relacionadas con la biología, donde se utiliza como un agente antibacteriano (Borrego, 2021).

1.2 Estructura cristalina del ZnO

Por su gran aplicación, es bien sabido que el ZnO se puede encontrar en una estructura de a) sal gema, b) wurzita o c) cúbica (blenda de zinc), Figura 1. La wurzita es la estructura cristalina más frecuente que puede presentar este metal, esto a raíz de su gran estabilidad térmica (Tokumoto y col., 2003).

Dicha estructura mencionada anteriormente, pertenece al grupo espacial $P6_3mc$ (C^4_{6v}) y se describe como una disposición alternada de capas de átomos de oxígeno y capas de átomos de zinc, dispuestas en forma de pilas a lo largo del eje vertical c . Existe un desplazamiento entre estas capas, que equivale al 0.38 veces el parámetro de red c . En condiciones normales de presión y temperatura, los valores de los parámetros de red para este material son $a = 3.253 \text{ \AA}$ y $c = 5.213 \text{ \AA}$ (Chung, 1997).

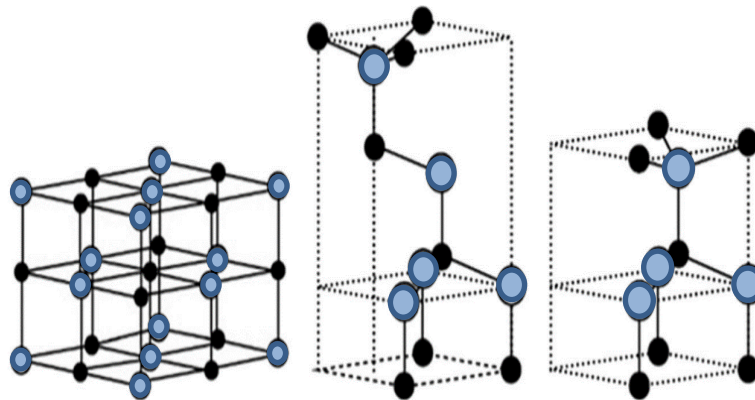


Figura 1. Modelo de estructuras de ZnO a) sal gema (cúbica), b) blenda de zinc (cúbica), y c) wurzita (hexagonal).

Fuente: Elaboración propia, en referencia a (Tokumoto y col., 2003)

Gracias a esta peculiar estructura, se es posible el obtener diversas nanoestructuras de ZnO (Figura 2), siendo utilizadas extensamente en aplicaciones optoelectrónicas y de detección, principalmente porque son fáciles de depositar, pudiéndose producir mediante simples métodos de elaboración comúnmente basados en soluciones, técnicas como sol-gel, SILAR, baño químico, etc. (Hewlett y McLachlan, 2016). Las nanoestructuras de ZnO se pueden presentar en nanopartículas (NP), nanobarras (NR), nanocables (NW), nanotubos, y estructuras macroporosas ordenadas en 3D (3DOM) (Illy y col., 2011).

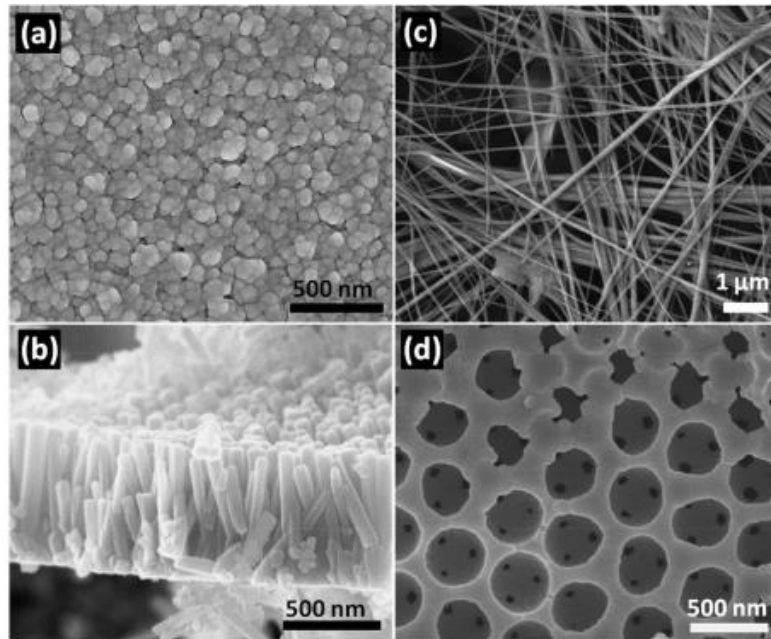


Figura 2. Nanoestructuras de ZnO, a) nanopartículas (NP), b) nanobarras (NR), c) nanocables (NW), y d) est. macroporosas (3DOM).

Fuente: (Gao y Li, 2009).

En base a estudios del autor Ramón Zaera y col., quienes desarrollaron nanopartículas con propiedades ópticas únicas, como diversos índices de refracción, alta transparencia, fotoluminiscencia novedosa y resonancia de plasmones. Estas propiedades hacen que estas nanopartículas sean prometedoras en aplicaciones como catalizadores, portadores de medicamentos, sensores, pigmentos, materiales magnéticos y ópticos, así como en bioimagen (Wang, 2004).

1.3 Propiedades ópticas y eléctricas

El ZnO presenta un ancho de banda energética de 3,3 eV y una fuerte unión de excitones de 60 meV a temperatura ambiente, lo que lo convierte en un semiconductor con excelentes propiedades electroópticas y estabilidad electroquímica (Khodja y col., 2001). Este material es químicamente estable, resistente al calor y a la radiación de alta energía. El tipo n de ZnO exhibe una amplia brecha de energía directa, alta

movilidad de electrones, altos voltajes de ruptura y una intensidad de campo de ruptura superior (Hannachi y col., 2023). Estas propiedades han llevado a su aplicación en dispositivos electrónicos de alta potencia, como dispositivos de emisión de campo, y como electrodos conductores transparentes en dispositivos optoelectrónicos diversos. La recombinación de electrones y huecos en ZnO genera luz ultravioleta/azul, lo que lo hace adecuado para aplicaciones en emisores de luz azul/UV (Vanathi y col., 2014). Estas características han convertido al ZnO en un material fundamental para optoelectrónica de longitud de onda corta (Gao y Li, 2009). Las propiedades ópticas y eléctricas detalladas de la wurzita monocristalina se presentan en la Tabla 1.

1.4 Propiedades de luminiscencia y dinámica reticular del ZnO

Las propiedades lumínicas del ZnO pueden ser analizadas mediante fotoluminiscencia (PL). Los espectros típicos de PL de las nanoestructuras de ZnO constan de dos partes distintas, la región de emisión ultravioleta (UV) y una emisión visible amplia. Sabiendo esto, la emisión UV, también conocida como emisión de nivel profundo, se atribuye a la recombinación de excitones, es decir, el nuevo acomodo de pares de electrones (Garcia y Nu, 2011). La emisión UV es dependiente de la cristalinidad del ZnO (Ruiz, 2008). La emisión visible está vinculada con la combinación de electrones y huecos de oxígeno, así como con huecos que han sido excitados por la luz en la banda de valencia. En consecuencia, el incremento de la intensidad está asociado con la cantidad de imperfecciones presentes (Onna, 2017).

Partiendo de una estructura cristalina de wurzita, la dinámica de red se puede calcular mediante el análisis de espectroscopía RAMAN. En un cristal de ZnO perfecto, los 4 átomos de cada celda unitaria dan lugar a los 12 modos de fonones. Un fonón es un modo cuantizado vibratorio que se encuentra en redes cristalinas de un sólido (Oslen y col., 2018). Estudios reportados por el autor Martínez Eduardo y colaboradores identificaron los modos de vibración para cristales de ZnS, CdS, BeO y ZnO, donde exponen que las vibraciones pueden ser producto del tamaño nanométrico del material, defectos y esfuerzos en la red (Martínez, 2013) (Tabla 1).

Tabla 1. Frecuencias de los modelos normales de vibración activos en RAMAN para el ZnO.

Modelos fonónicos	Frecuencia (cm ⁻¹)	Tamaño (nm)	Muestra
E ₂ (low)	101, 102	8.5 nm y 4.0 nm	Cristales de ZnO
E ₂ (high)	444, 438, 464		Películas delgadas
A ₁ (TO)	380, 380, 393		Nanopartículas
E ₁ (TO)	413, 409		
A ₁ (LO)	579		
E ₁ (LO)	591, 587, 588, 584		

Adaptado de fuente: (Ruiz, 2012)

1.5 Propiedades térmicas

Factores como el coeficiente de expansión térmica, calor específico y conductividad térmica, integran las propiedades térmicas del ZnO. El valor de expansión térmica de un material se conoce como la deformación de la red cristalina con respecto a las fluctuaciones de temperatura; este valor para el ZnO en el eje "a" corresponde $\alpha = 4.31 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, en el eje "c" $\alpha = 2.49 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a 300 °K (Altarejos, 2019).

La conductividad térmica se refiere a la propiedad de un material para transmitir calor y es crucial, especialmente en situaciones en que aparatos están expuestos a elevadas potencias y/o temperaturas (Miren y Guisasola, 2018). En el caso de un material semiconductor como el ZnO, varios factores, incluyendo los defectos puntuales, influyen en su conductividad térmica, generando un efecto similar al observado en otros semiconductores (Morales, 2020). La Figura 3 explica el concepto de la expansión térmica de los materiales relacionándola a la asimetría de la curva de energía de enlace atómico en comparación a su distancia de enlace atómico.

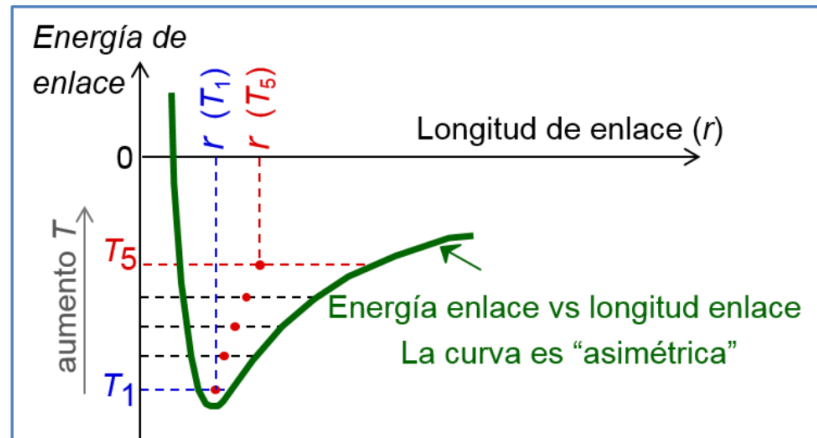


Figura 3. Expansión térmica, relación entre energía de enlace atómico y distancia de enlace atómico.

Fuente: (Miren y Guisasola, 2018).

El calor específico se refiere a la cantidad de calor que un material puede almacenar por unidad de masa. Esta propiedad está determinada por las vibraciones en la estructura del material, la presencia de portadores libres (partículas cargadas que pueden moverse libremente) y los defectos en su composición, factores que contribuyen a la capacidad del material para transportar calor. En el caso del ZnO, a una presión constante, su capacidad calorífica específica se ha medido como $C_p=40,3 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ (Altarejos, 2019).

2. Mecanismo de degradación fotocatalítica del zno.

2.1 Fotocatálisis.

La fotocatalisis ofrece una manera sencilla de utilizar la luz natural proveniente del sol mediante la combinación fotoquímica y catálisis para obtener una sociedad sustentable gracias a la recolección de la misma (Mendivil, 2012). En términos más simples, la fotocatalisis se refiere a la aceleración de una reacción química mediante la presencia de un catalizador cuando se expone a la luz (Solis, 2016). Esta definición abarca la

fotosensibilización, que implica una modificación química inducida por la absorción de radiación por parte de un compuesto llamado fotosensibilizador, lo que desencadena cambios en otra sustancia química (Bello, 2011).

En 1839, el científico Edmond Becquerel descubrió el proceso fotocatalítico, inspirado en la fotosíntesis natural. En este fenómeno, las plantas, microalgas y ciertos organismos microscópicos aprovechan la energía solar para convertir el dióxido de carbono (CO_2) y el agua (H_2O) en carbohidratos, marcando así el inicio de la investigación en este campo (Medrano, 2021).

En las últimas décadas, la utilización de la fotocatalisis ha experimentado un crecimiento acelerado, sobre todo en los campos de energía y medio ambiente. La palabra "fotocatalisis" está formada por dos elementos: el prefijo "foto", que denota "luz", y "catálisis", que representa el proceso mediante el cual un reactivo se descompone con la ayuda de un catalizador que altera la velocidad de una reacción química (Heredia, 2022). Un catalizador no está involucrado directamente en la reacción, pero incrementa la rapidez del cambio químico (Atares, 2013). La principal distinción entre un catalizador tradicional y un fotocatalizador radica en el método de activación. Un catalizador común se activa por medio del calor, mientras que un fotocatalizador se activa utilizando fotones con la energía adecuada (Tejada, 2022) (Figura 4).

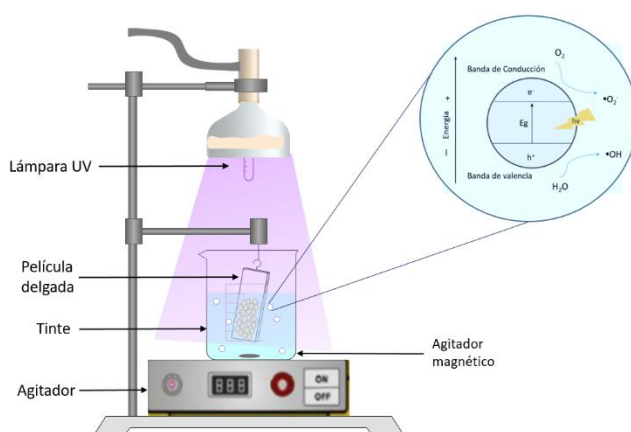


Figura 4. Ilustración esquemática de la configuración experimental para el proceso fotocatalítico.

Fuente: Elaboración propia, en referencia de Pawar y col. (2013).

2.2 Mecanismo de fotocatalisis a partir de semiconductores.

La eficacia de la reacción fotocatalítica se encuentra mayormente determinada por la energía del fotón y las características del catalizador empleado (Bermejo, 2018). Para este proceso se suelen emplear óxidos semiconductores como catalizadores (Ortega y col., 2011). En los semiconductores se tienen bandas asociadas a los niveles de energía; la que presenta una menor energía tienen la mayor densidad electrónica, esto partiendo de los enlaces covalentes entre los átomos, llamándose así banda de valencia. Por otro lado aquellos niveles con más alta energía se denominan bandas de conducción (Vilchez y col., 2017).

Cuando los semiconductores son expuestos a la luz ($h\nu$), los electrones en la banda de valencia (BV) absorben la energía de los fotones y son excitados a una banda de energía superior, llamada banda de conducción (BC). Esto crea huecos (e^-/h^+) en la banda de valencia, donde los electrones solían estar. Estos electrones excitados y vacíos se ven involucrados en procesos químicos al encontrarse en contacto con sustancias químicas cercanas. En la Figura 5 se ilustra el mecanismo de fotoexcitación de un material semiconductor.

En el contexto de la fotocatalisis, los electrones excitados pueden reducir las moléculas cercanas, mientras que los huecos pueden oxidar otras moléculas (Grela y col., 2004). Esto facilita la degradación de contaminantes orgánicos en el agua y el aire, así como la producción de compuestos químicos útiles, como el hidrógeno a partir del agua (Estrella G., 2018). En resumen, la fotocatalisis utilizando semiconductores implica la absorción de luz por parte del semiconductor, la generación de pares de electrones y huecos, y la utilización de estos pares para catalizar reacciones químicas.

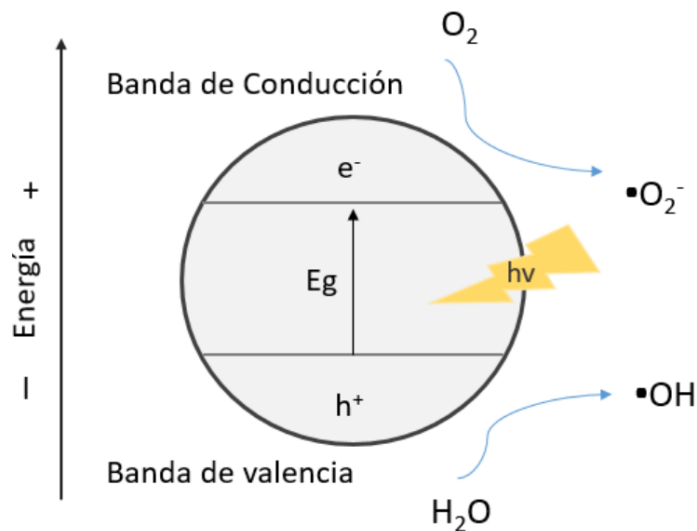


Figura 5. Representación del proceso de separación y transporte de carga en un material por foto-oxidación.

Adaptado de fuente: (Bermejo, 2018)

3. Antecedentes.

3.1 Aplicación del ZnO en la eliminación de tintes.

La Tabla 2 tiene como objetivo analizar y contrastar diferentes aspectos de la fotogeneración en diversas aplicaciones. Al entender cómo diferentes materiales y condiciones afectan el proceso de fotogeneración, podemos mejorar la eficiencia de las tecnologías actuales y desarrollar nuevas soluciones innovadoras. Se exploran varios factores clave, como la eficiencia de conversión de luz en energía química, la estabilidad de los materiales utilizados, las condiciones ambientales óptimas y las posibles aplicaciones industriales; partiendo de materiales nanoestructurados en forma de películas delgadas de ZnO. Al examinar detenidamente estos elementos, podemos identificar tendencias, desafíos y oportunidades que impulsarán la investigación futura en este emocionante campo.

La siguiente tabla (Tabla 2) pone en comparación en un primer vistazo los métodos de depósito de películas delgadas, destacando la técnica sol-gel, pulverización catódica

(sputtering) y evaporación térmica, por mencionar algunas. Existen innumerables métodos de depósito de sustratos, como el rociado pirolítico, depósito químico de vapor, molienda mecánica, irradiación ultrasónica; todos estos en comparación a los primeros mencionados requieren grandes aportes de energía como también de equipo costos y de complicada manipulación.

Sobre la misma tabla, en el apartado de resultados, nos dan una idea muy general pero concisa de cómo fue que se llevó a cabo las pruebas de fotocatalisis, detallando la concentración del agente contaminante y su degradación en referencia al tiempo de exposición. Cada una de estas técnicas de depósito empleadas, nos arrojan una aportación enfocada en la respuesta fotocatalítica de cada película en base a sus propiedades físicas, como por ejemplo, que la rugosidad de la superficie del catalizador mejora la actividad fotocatalítica, o entre más hidrofílica es la superficie de la película, mayor es la fotorreducción inducida, y que conforme vaya en aumento la temperatura del tratamiento térmico, y la técnica de depósito mejoran significativamente la linealidad cristalina y la rugosidad de la superficie de la película delgada, mejorando el rendimiento fotocatalítico.

Tabla 2. Recopilación de investigaciones de fotocatalisis a partir de películas delgadas de distintos materiales.

Condiciones y resultados		
Sustrato	Sustrato de vidrio	(Altinta y Hanife, 2016)
P. delgada	ZnO/Co	
M. depósito	Sol-gel	
Las actividades fotocatalíticas de las películas delgadas se evaluaron en función de la luz visible para degradar MB. Como fuente de luz se utilizó una lámpara de xenón con un filtro de corte de 420 nm, a temperatura fría. Se determinó que el contenido óptimo de Co es de 3% para la actividad fotocatalítica de las películas ZnO/Co.		
Sustrato	Sustrato de vidrio de cuarzo	(Okemoto y col., 2016)
P. delgada	Pinceno	

M. depósito	Evaporación térmica al vacío	<p>La descomposición del agua se llevó a cabo en un sistema de reactor discontinuo. El catalizador preparado (película) se colocó en una solución acuosa de urea (0,3 M). El catalizador que contiene una película más delgada (50nm) mostró la mejor actividad fotocatalítica debido a la rugosidad de la superficie del catalizador.</p>
Sustrato	Sustrato de cuarzo	
P. delgada	TiO ₂ , C ₁₁ H ₄ O ₅ /Cu	<p>(Pham y col., 2015)</p>
M. depósito	Pulverización catódica (Sputtering)	
<p>Las reacciones se realizaron en un reactor de lecho de cuarzo, utilizando una película delgada de catalizador sumergida en 35 ml de MB (Co^{1/4}10 ppm. La interacción cinética del Cu con el sistema fotocatalizador mejoró su actividad fotocatalítica en la decoloración de MB. La relación entre la humectabilidad y la actividad fotocatalítica nos dice que en cuanto más hidrofílica es la superficie de la película, mayor es la fotorreducción inducida y revertida por el MB.</p>		
Sustrato	Sustrato de vidrio	<p>(Ravichandra n y Sindhuja, 2019)</p>
P. delgada	ZnO/ g-C ₃ N ₄ /Ag	
M. depósito	Pulverización catódica con nebulizador de chorro	
<p>La película recubierta se montó dentro del tubo de ensayo lleno con 100 ml de una solución acuosa de MB/MG (1 x 10⁻⁵ mol/L). Lámpara de tungsteno de 500 W con corte de 420 nm. Los estudios fotocatalíticos muestran que la adición de Ag y g- C₃N₄ mejora notablemente la eficiencia fotocatalítica del ZnO. La película delgada de ZnO/g-C₃N₄/Ag provoca una descomposición del 96 y 99 % de las moléculas de tinte azul de metileno (MB) y verde malaquita (MG), respectivamente.</p>		
Sustrato	Sustrato de vidrio	<p>(Katal y col., 2020)</p>
P. delgada	Óxido de cobre (CuO)	
M. depósito	Pulverización catódica (Sputtering)	

<p>Las muestras se colocaron en el fondo de un vaso de precipitados, 20 ml de solución de 10,0 mg L⁻¹ MB. El vaso se colocó sobre un agitador (50rpm, 25°C) durante 30 min en la oscuridad. Para el experimento fotocatalítico, se utilizó una lámpara de xenón de 150 W como fuente de luz. Se demostró que aumentar la temperatura del tratamiento térmico, y la técnica de depósito mejoran significativamente la linealidad cristalina y la rugosidad de la superficie de la película delgada de CuO, mejorando el rendimiento fotocatalítico.</p>		
Sustrato	Sustrato de silicio	
P. delgada	SiO ₂ /ZnO	
M. depósito	Sol-gel	
<p>Las pruebas fotocatalíticas se realizaron en una solución acuosa utilizando MB. Las muestras se irradiaron con luz UV(A) de 1 mW/cm² (tubo UV de 20 W. Los resultados indican que el 10% en peso de ZnO-SiO₂ recocido a 600 °C mostró la mayor actividad fotocatalítica para la fotodegradación de MB.</p>		(Atif Mossad y col., 2014)
Sustrato	Sustrato de vidrio	
P. delgada	Ag/AgCl/TiO ₂	
M. depósito	Sol-gel	
<p>Se colocó la película de Ag/AgCl/ TiO₂ en una solución acuosa de 4-clorofenol de 15 ml con una concentración de 1 × 10⁻⁵ M, como fuente de luz visible se utilizó una lámpara de xenón de 300 W a 10 cm de la celda. El mecanismo fotocatalítico se basó en el hecho de que las NP de Ag se fotoexcitan debido al plasmón de resonancia, la separación de carga se logra mediante la transferencia de electrones fotoexcitados desde el NPs de Ag a la banda de conducción de TiO₂ y la formación simultánea de radical OH y ClO, que causan la degradación fotocatalítica de contaminantes orgánicos.</p>		(Zhou y col., 2011)

Fuente: Elaboración propia.

4. Agentes que influyen en la eficiencia en el proceso de fotodegradación.

4.1 Efecto de la carga del ZnO.

El autor Amanda Álvarez en el 2023 reportó novedades respecto al efecto de la carga del catalizador sobre la eficiencia del fotocatalizador. Estos resultados señalaron que la velocidad de descomposición por acción de la luz aumenta en función a la cantidad de catalizador aplicado. Este fenómeno parte del hecho de que un aumento en la cantidad de catalizador mejora tanto el área de superficie activa total como la cantidad de sitios reactivos en la superficie del catalizador. En consecuencia, también aumenta el número de radicales hidroxilo y superóxido, lo que facilita la descomposición de los contaminantes orgánicos. Esta mejora condujo a un aumento en el porcentaje de descomposición (Álvarez, 2023). Por otro lado, se debe de tener un estricto control sobre estas cantidades adicionales de catalizador, ya que se nota que la turbidez de la solución también aumenta. Este fenómeno limita la penetración de luz, ocasionando que el volumen fotoactivo disminuya (Rosas Chicas, 2015).

4.2 Concentración del agente contaminante.

Numerosos estudios han demostrado que la concentración de las sustancias orgánicas contaminantes en solución acuosa tiene un impacto negativo en la tasa de degradación. En referencia al autor Torres López, la respuesta de degradación disminuye con forme se aumenta la concentración de sustrato. En otras palabras, a medida que se incorpore más contaminante, se absorben cada vez más sustancias orgánicas en la superficie del catalizador; por ende, aumenta la demanda de especies oxidantes (OH, O₂). El consumo desmedido de radicales OH por parte de los intermediarios genera merma el porcentaje de degradación en una solución altamente concentrada de agentes contaminantes (T. López, 2013).

4.3 pH de la solución.

Entender cómo el pH influye en la eficacia del proceso de fotodegradación del colorante representa un gran desafío, dada la variedad de roles que desempeña. En primer lugar, está asociado con el nivel de ionización en la superficie del catalizador, influyendo en la adsorción de las moléculas del colorante. En segundo lugar, los

hidroxilos radicales pueden formarse a partir de la interacción entre los iones hidroxilo y las cargas positivas vacantes. Estas vacancias positivas son las especies dominantes de oxidación en entornos con bajos niveles de pH, mientras que los radicales hidroxilos son considerados como las especies predominantes en entornos con niveles de pH neutros o alcalinos. Por lo tanto, en una solución alcalina, los radicales OH son generados con mayor facilidad a través de la oxidación de los iones hidroxilo más accesibles en la superficie, lo cual naturalmente conduce a una mayor eficacia en el proceso (Bermejo, 2018).

4.4 Temperatura.

Una de las ventajas de la fotorreacción es que su efectividad no se ve alterada por las fluctuaciones de temperatura. En el proceso fotocatalítico, los pasos influenciados por la temperatura son la adsorción y desorción de los reactivos y productos en la superficie del fotocatalizador. Sin embargo, ninguno de estos pasos parece ser el factor determinante de la velocidad del proceso. Se ha observado que el impacto de la temperatura es mínimo en la degradación fotocatalítica de soluciones acuosas que contienen colorantes, como se indica en un estudio realizado por Hernández en 2022 (Isidro Hernández, 2022).

Vásquez y col., en 2016 descubrieron que la influencia de la temperatura en el proceso de degradación fotocatalítica es mínima cuando se encuentra en el rango de 10-68°C. Temperaturas elevadas pueden afectar adversamente la cantidad de oxígeno disuelto en la solución, lo que, a su vez, incrementa la recombinación de huecos y electrones en la superficie del fotocatalizador (Vásquez y col., 2016).

5. Estrategias para la mejora fotocatalítica del ZnO.

5.1 Limitaciones del ZnO como fotocatalizador.

La creación y desarrollo de un fotocatalizador que posea una estructura de banda adecuada, que sea capaz de absorber una amplia gama de longitudes de onda en el espectro visible, además de tener un alto potencial redox y ser estable, sigue siendo un desafío en el campo de la investigación. Muy a menudo, los principales retos están

relacionados con la absorción inadecuada de la luz en la región visible (no logran captar suficientes fotones), y esto nos lleva a la separación insuficiente de los portadores de carga (no se tiene la energía suficiente para que los electrones puedan viajar a la banda de conductividad), (Escobar y Solís, 2020). Siendo esto punto de partida para la busca de implementaciones capaces de controlar dichas limitaciones.

El uso del ZnO como fotocatalizador presenta diversos inconvenientes durante su aplicación.

- I. Debido a que su ancho de banda prohibida se encuentra en el rango del ultravioleta, el ZnO es transparente al espectro de luz visible, razón por la que solo se es posible beneficiarse de una pequeña fracción de luz solar (3-5%) (Villagrán, 2018).
- II. El elevado índice de recombinación de los portadores de carga fotoinducidos dificultan su llegada a la superficie, esto provoca un retraso en las reacciones químicas que ocurren en la interfaz entre el semiconductor y el líquido (Martínez, 2013).
- III. Cuando se es sometido a irradiación, el ZnO presenta una alta fotocorrosión; además de disolverse en soluciones ácidas y alcalinas (Villagrán, 2018).

Se han encontrado innumerables investigaciones que buscan mejorar la respuesta ante la luz visible de este óxido, y la solución más recurrente es la adaptación de dopajes, permitiendo acoplar metales, no metales, semiconductores y algunas tierras raras.

5.2 Dopaje de ZnO con elementos metálicos y no metálicos

El dopaje ha sido extensamente empleado como uno de los medios más eficaces para mejorar la conductividad electrónica y ampliar el rango de los semiconductores al disminuir efectivamente su brecha de energía prohibida. En resumen, agregar metales nobles (Au, Ag, Pt o Pd), metales (Fe, Mg, Ca y Al), y/o elementos no metálicos como nitrógeno (N), carbono (C) y azufre (S), tiene un impacto positivo en la fotoactividad de los semiconductores en la región visible del espectro electromagnético (Kumaresan y

col., 2017).

Se dio a la tarea de recopilar información referente a la influencia del dopado mediante distintos elementos metálicos y no metálicos sobre el rendimiento fotocatalítico del ZnO, esto se resume en la Tabla 3. En dicha tabla, se muestran aspectos experimentales que se tomaron en cuenta en cada uno de los casos, se pone en contraste el agente dopante y la eficiencia de este, el haz de luz y el contaminante como base de referencia. Analizando los datos, podemos ver y resaltar el efecto de la plata sobre el ZnO, ya que en varios casos se aprecia una degradación del 100 % en lapsos de 90 a 180 minutos.

Tabla 3. Recopilación de resultados de ZnO dopado con distintos metales como fotocatalizadores.

Dopante	Haz de luz	Condiciones experimentales		Eficiencia fotocatalítica	
Pt	15 W Dos lámparas UV de 365 nm	Catalizador	50 mg	90% en 120 min	(Yuan y col., 2010)
		Contaminante	Violeta de metilo=10 ppm		
		100 ml			
Ag (3.5 % molar)	15 W Lámpara de mercurio	Catalizador	0.15 g/L	100% en 90 min	(Mohamma d-zadeh, 2015)
		Contaminante	Azul ácido 113= 20 ppm		
		pH = 7.5			
Ag	$\lambda = 420$ nm	Catalizador	20 mg	80% en 150 min	(Wang y col., 2015)
		Contaminante	Rodamina B = 20 mg/L		
		40 ml			
Ag (5% molar)	Luz solar	Catalizador	0.01 g	90% en 30 min	(Zhai y col., 2015)
		Contaminante	Rodamina B= 1×10^{-5} mol/L		

		pH=7			
Ag (1% en peso)	Lámpara visible de 250 W	Catalizador	1 g/L	100% en 150 min	(Bouزيد y col., 2015)
		Contaminante	Azul de metileno = 0.02 mM		
		100 ml			
Ag	Lámpara de Xenón $\lambda = 390-770$ nm	Catalizador	2 x 2 cm	100% en 90 min	(Han y col., 2012)
		Contaminante	Rodamina B = 5 μ M		
		50 ml			
Ag (0.10 M)	Lámpara de Xenón 500W $\lambda = 365-720$ nm	Catalizador	10 mg	97% en 180 min	(Zheng y col., 2008)
		Contaminante	Rodamina B = 30 ppm		
		200 ml			
Pd (5% en peso)	Luz UV 100 W $\lambda = 365$ nm	Catalizador	50 mg	98.2% en 60 min	(Seddigi y col., 2014)
		Contaminante	Metil terc-butil éter = 2.3×10^{-5} M		
		250 ml			
Pd (1% en peso)	Lámpara UV	Catalizador	100 mg	100% en 300 min	(Güy y col., 2016)
		Contaminante	Metil terc-butil éter = 100 ppm		
		350 ml			
Au (0.5% en peso)	Lámpara de Xenón 300W	Catalizador	10 mg	100% en 120 min	(Nagajyothi y col., 2016)
		Contaminante	Ácido salicílico = 100 μ M		
Au	Lámpara de	Catalizador	30 mg	100% en	(Lu y col.,

(0.75% mol/L)	Xenón 300 W	Contaminante	Naranja de metilo = 5 mg/L	180 min	2016)
		20 ml			
Au	Lámpara de 100W $\lambda \geq 400$ nm	Catalizador	0.5 cm ²	100% en 180 min	(Ghosh y col., 2015)
		Contaminante	Rodamina B = 5.0x10 ⁻⁶ M Phenol=5.0x10 ⁻⁶ M		
		10 ml			
Ce (3.28% peso)	Lámpara de mercurio 125 W	Catalizador	0.075 g	99.5% en 70 min	(Kumar y col., 2015 b)
		Contaminante	Rojo-23=40ppm		
		150 ml			
Mg (2% en peso)	Lámpara UV- C 15 W $\lambda=254$ nm	Catalizador	40 mg	EEO= 86.00 kWh/m ³ /ord en	(Zarei y Behnajady, 2016)
		Contaminante	Rodamina B =10 mg/L		
		100 ml			
Fe	Lámpara fluorescente 65 W	Catalizador	30 mg	99.8 en 180 min	(Kwong y Yung, 2015)
		Contaminante	Tropaeolin O= 10 mg/L		
		pH=9, 20 ml			

Fuente: (Pirhashemi y col., 2018).

Conclusiones

La implementación de ZnO nanoestructurado en procesos de fotodegradación de contaminantes emerge como una estrategia novedosa y prometedora para hacer frente a los desafíos medioambientales actuales. Este óxido metálico no solo destaca por su alta eficiencia en la eliminación de contaminantes tóxicos y persistentes, sino que también presenta una serie de beneficios significativos. Basándonos en investigaciones previas realizadas por numerosos autores, se ha comprobado que la

alta área superficial y la habilidad para crear pares de electrones y huecos de carga mediante la exposición a la radiación ultravioleta posibilitan una descomposición rápida y eficiente de los contaminantes.

- I. El ZnO presenta una estructura cristalina de tipo wurzita o hexagonal compacta, esto influye de gran medida en las propiedades fotocatalíticas de dicho material, ya que proporciona sitios activos en la superficie del material para la adsorción del contaminante y la generación de pares electrón-hueco.
- II. El óxido de zinc exhibe propiedades ópticas notables, siendo un semiconductor con un ancho de banda relativamente amplio, facilita la absorción eficiente de radiación UV. La conductividad eléctrica de este óxido favorece a la movilidad de los portadores de carga, garantizando una rápida separación y migración de los pares e-h.
- III. La estabilidad térmica del ZnO influye en su durabilidad y en la posibilidad de aplicaciones en condiciones ambientales variables.
- IV. El zinc y oxígeno son materiales abundantes y de bajo costo, lo que hace que el ZnO sea una opción económica para aplicación fotocatalítica a gran escala.

Estas propiedades junto con factores como, la concentración del ZnO, pH de la solución, temperatura y concentración del contaminante, son factores cruciales para garantizar o de alguna manera predecir la eficacia del fotocatalizador. Para mejorar la respuesta de este óxido metálico se han estado reportando avances científicos que sugieren el dopar con elementos metálicos o no metálicos el ZnO, destacando la plata, cobre, oro y magnesio. Al incorporar estos agentes, se puede modificar la estructura o niveles de energía del semiconductor, ampliando su rango de absorción de luz o mejorando la separación de portadores de carga, esto puede resultar en una mayor generación de pares electrón-hueco y en una mayor actividad fotocatalítica, A medida que la investigación en este campo avanza, se espera que las nanopartículas de ZnO sigan desempeñando un papel crucial en la purificación del agua y el aire, contribuyendo así significativamente a un futuro más limpio y saludable para nuestro planeta.

Se plantea como futura indagación el recolectar información referente a la posibilidad de aumentar su efectividad. Se han desarrollado una serie de técnicas de modificación y aditivos químicos para minimizar las pérdidas por recombinación de los portadores de carga y se ha ampliado la respuesta espectral del ZnO al espectro visible mediante la aplicación de dopaje metálico, dopaje no metálico, dopaje RE, co-dopaje y semiconductores.

REFERENCIAS.

- Agustín García, A. F. (2023). Nanociencia, nanotecnología y nanoanalítica: Anotaciones, historia y anécdotas. *Real Academia Nacional de Farmacia*, 126: 11-33. <https://ranf.com/wp-content/uploads/academicos/discursos/numero/asuero/garciaasuero.pdf>
- Altarejos, D. A. Z. (2019). Medida de la conductividad térmicas de materiales porosos. *Biblioteca ETSI Industriales UPM*, 123: 10-12. <https://oa.upm.es/56064/>
- Altintas Yildirim, O., & Hanife, A. (2016). Facile synthesis of cobalt-doped zinc oxide thin films for highly efficient visible light photocatalysts. *Applied Surface Science*, 390: 111-121. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.08.069>
- Atares Huerta, L. (2013). Efecto del catalizador sobre la velocidad de reacción. *Compendio de Enzimología*, 155: 20-55. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/83412/Atarés - Efecto del catalizador sobre la velocidad de reacción.pdf?sequence=1>
- Atif Mossad, A., Adel A. e Ismail, R. N. (2014). Preparation and characterization of ZnO-SiO₂ thin films as highly efficient photocatalyst. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 275: 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2013.11.002>
- Bello, U. A., & Exactas, F. D. E. C. (2011). Estudio fotofísico y fotoquímico de nuevas dihidropiridinas antihipertensivas en sistemas homogéneos y microheterogéneos. 58: 38-46. <http://repositorio.unab.cl/xmlui/handle/ria/1203>
- Bermejo, M. (2018). Fotocatalisis y su capacidad descontaminante. Aplicación en gran vía. *Fotocatalizador*, 1, 47: 7-22. <https://oa.upm.es/49612/%0A>
- Borrego, A. (2021). Caracterización óptica-estructural y fotocatalítica de nano partículas de ZnO, TiO₂ y Zn₂TiO₄ procesados por molienda de alta energía. 10, 188: 45-35.
- Bouzzid, H., Faisal, M., Harraz, F. A., Al-Sayari, S. A., & Ismail, A. A. (2015). Synthesis of mesoporous Ag/ZnO nanocrystals with enhanced photocatalytic activity. *Catalysis Today*, 252, 7: 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2014.10.011>
- Caglar, M., Ilican, S., Caglar, Y., & Yakuphanoglu, F. (2009). Electrical conductivity and

- optical properties of ZnO nanostructured thin film. *Applied Surface Science*, 255(8), 4491–4496. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.11.055>
- Chen, X., Lu, W., Xu, T., Li, N., Qin, D., Zhu, Z., Wang, G., & Chen, W. (2017). A bio-inspired strategy to enhance the photocatalytic performance of g-C₃N₄ under solar irradiation by axial coordination with hemin. *Applied Catalysis B: Environmental*, 201: 518–526. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.08.020>
- Cheong, K. Y., Muti, N., & Ramanan, S. R. (2002). Electrical and optical studies of ZnO:Ga thin films fabricated via the sol-gel technique. *Thin Solid Films*, 410(1–2): 142–146. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(02\)00286-9](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(02)00286-9)
- Chung, D. D. L. (1997). Processed and Packaged. In *Chemical Vapor Deposition. Semiconductors* (Issue 5, pp. 288–289). <https://news.skynix.com/semiconductor-back-end-process-episode-3-understanding-the-different-types-of-semiconductor-packages/>
- Escobar Alarcón, L., & Solís Casados, D. A. (2020). Desarrollo de fotocatalizadores basados en TiO₂ en forma de película delgada para la degradación de moléculas orgánicas en solución acuosa. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencias y Nanotecnología*, 14(26), 23: 1-14. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2021.26.69646>
- Estrella González, A. (2018). Actividad Fotocatalítica de TiO₂ y Fe-TiO₂ Dispersos en una matriz de Silice para la Degradación de Contaminantes Ambientales bajo Luz UV y Visible. 2, 95: 13-19.
- Gao, W., & Li, Z. (2009). Nanostructures of zinc oxide. *International Journal of Nanotechnology*, 6(3–4), 8: 1-7. <https://doi.org/10.1504/IJNT.2009.022917>
- Garcia, R., & Nu, R. (2011). Synthesis and characterization of In-doped ZnO nanopowders produced by combustion synthesis. *Revista Mexicana de Física*, 57(2), 4: 1-4.
- Ghosh, A., Guha, P., Samantara, A. K., Jena, B. K., Bar, R., Ray, S., & Satyam, P. V. (2015). Simple growth of faceted Au-ZnO hetero-nanostructures on silicon substrates (nanowires and triangular nanoflakes): A shape and defect driven enhanced photocatalytic performance under visible light. *ACS Applied Materials*

- and Interfaces, 7(18), 37: 3-11. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b00634>
- Grela, M. A., Loeb, B., Restrepo, G. M., Lagorio, M. G., & San Román, E. (2004). Los mecanismos de eliminación de contaminantes orgánicos. *Eliminación de Contaminantes Por Fotocatálisis Heterogénea*, 4, 118: 103-105.
- Guadalupe Rivera Gutiérrez, R., Preciado Rangel, P., Fortis Hernández, M., Yescas Coronado, P., & Arnaldo Orozco Vidal, J. (2021). Zinc oxide nanoparticles and their effect on melon yield and quality. *Revista Mexicana Ciencias Agrícolas* 2021, 12(5), 13: 1-3.
- Güy, N., Çakar, S., & Özacar, M. (2016). Comparison of palladium/zinc oxide photocatalysts prepared by different palladium doping methods for congo red degradation. *Journal of Colloid and Interface Science*, 466, 10: 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2015.12.009>
- Han, Z., Ren, L., Cui, Z., Chen, C., Pan, H., & Chen, J. (2012). Ag/ZnO flower heterostructures as a visible-light driven photocatalyst via surface plasmon resonance. *Applied Catalysis B: Environmental*, 126, 8: 1-3. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2012.07.002>
- Hannachi, E., Slimani, Y., Nawaz, M., Sivakumar, R., Trabelsi, Z., Vignesh, R., Akhtar, S., Almessiere, M. A., Baykal, A., & Yasin, G. (2023). Preparation of cerium and yttrium doped ZnO nanoparticles and tracking their structural, optical, and photocatalytic performances. *Journal of Rare Earths*, 41(5), 682–688. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2022.03.020>
- Heredia, D. J. A. de los R. (2022). Química de materiales. Catálisis. *Revista Tendencias En Docencia e Investigación Química*, 289–302. <https://revistatediq.azc.uam.mx/>
- Hewlett, R. M., & McLachlan, M. A. (2016). Surface structure modification of ZnO and the impact on electronic properties. *Advanced Materials*, 28(20), 3893–3921. <https://doi.org/10.1002/adma.201503404>
- Illy, B. N., Cruickshank, A. C., Schumann, S., Da Campo, R., Jones, T. S., Heutz, S., McLachlan, M. A., McComb, D. W., Riley, D. J., & Ryan, M. P. (2011). Electrodeposition of ZnO layers for photovoltaic applications: Controlling film

- thickness and orientation. *Journal of Materials Chemistry*, 21(34): 12949–12957.
<https://doi.org/10.1039/c1jm11225b>
- Isidro Hernández, K. (2022). Degradación del colorante textil azo azul reactivo 69 (lanasol) por fotocatalisis heterogénea. *División de Ciencias Básicas e Ingeniería*, 131: 5-20. <https://doi.org/10.24275/uama.6734.8928>
- Jiménez, E., Castellote, M. (2018). La fotocatalisis en construcción: Fundamentos y Métodos de Medida. [En línea] Disponible en: <https://docplayer.es/95379940-La-fotocatalisis-en-construccion-fundamentos-y-metodos-de-medida.html>. Fecha de consulta: 15 de noviembre de 2023.
- Kannan, S., Subiramaniam, N. P., & Sathishkumar, M. (2021). Investigation on the structural, optical and photocatalytic degradation properties of ZnS/Mn:Zns thin films under visible light irradiation. *Materials Today: Proceedings*, 38: 907–912. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.311>
- Katal, R., Masudy-panah, S., Kong, E. Y. J., Dasineh Khiavi, N., Abadi Farahani, M. H. D., & Gong, X. (2020). Nanocrystal-engineered thin CuO film photocatalyst for visible-light-driven photocatalytic degradation of organic pollutant in aqueous solution. *Catalysis Today*, 340 (May 2018), 236–244. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.12.019>
- Khodja, A. A., Sehili, T., Pilichowski, J. F., & Boule, P. (2001). Photocatalytic degradation of 2-phenylphenol on TiO₂ and ZnO in aqueous suspensions. *Journal of Photochemistry and Photobiology, Chemistry*, 141(2–3): 231–239. [https://doi.org/10.1016/S1010-6030\(01\)00423-3](https://doi.org/10.1016/S1010-6030(01)00423-3)
- Kumar, R., Rashid, J., & Barakat, M. A. (2015 a). Zero valent Ag deposited TiO₂ for the efficient photocatalysis of methylene blue under UV-C light irradiation. *Colloids and Interface Science Communications*, 5: 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.colcom.2015.05.001>
- Kumar, R., Umar, A., Kumar, G., Akhtar, M. S., Wang, Y., & Kim, S. H. (2015 b). Ce-doped ZnO nanoparticles for efficient photocatalytic degradation of direct red-23 dye. *Ceramics International*, 41(6): 7773–7782. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.02.110>

- Kumaresan, S., Vallalperuman, K., Sathishkumar, S., Karthik, M., & SivaKarthik, P. (2017). Synthesis and systematic investigations of Al and Cu-doped ZnO nanoparticles and its structural, optical and photo-catalytic properties. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28(13): 9199–9205. <https://doi.org/10.1007/s10854-017-6654-7>
- Kwong, T. L., & Yung, K. F. (2015). Surfactant-free microwave-assisted synthesis of Fe-Doped ZnO nanostars as photocatalyst for degradation of tropaeolin O in water under visible light. *Journal of Nanomaterials*, 2015: 190747. <https://doi.org/10.1155/2015/190747>
- Lacombe, S., & Keller, N. (2012). Photocatalysis: Fundamentals and applications in JEP 2011. *Environmental Science and Pollution Research*, 19(9): 3651–3654. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1040-8>
- López Vásquez, A., Almanza, O., Acosta, M. F., & Suárez-Escobar, A. (2016). Degradación fotocatalítica de contaminantes orgánicos presentes en agua residual de la industria litográfica mediante óxido de Bismuto(III)/óxido de Titanio (Bi₂O₃/TiO₂). *Informacion Tecnologica*, 27(1): 147–158. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642016000100016>
- Lu, J., Wang, H., Peng, D., Chen, T., Dong, S., & Chang, Y. (2016). Synthesis and properties of Au/ZnO nanorods as a plasmonic photocatalyst. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 78: 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2015.11.035>
- Martínez, E. D. (2013). Películas delgadas nano-compuestas (nanopartícula metálica/matriz mesoporosa) con aplicaciones en espectroscopía RAMAN amplificada por superficies. Departamento Académico de Agrosilvo Pastoral, 75: 4-10. Tesis [En línea] Disponible en: https://repositorio.unsm.edu.pe/bitstream/11458/574/1/TFCA_114.pdf
- Medrano, D. R. (2021). Actividad fotocatalítica de perovskitas de Nd para la degradación de contaminantes. Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, 96: 7-13. Tesis [En línea] Disponible en: <http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/3479>
- Mendivil Reynoso. (2012). Fabricación de transistores FET a base de una película

- delgada de ZnO. División de Ciencias Exactas y Naturales, 75: 6-27. Tesis [En Línea] Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12984/7572>
- Miren García R. N., Monasterio Guisasola, A. (2018). Transmisión de calor por electrones. *Introducción a La Ciencia de Los Materiales y Sus Propiedades*. [En Línea]. Disponible en: <https://acortar.link/Dlz7Kx>. Fecha de consulta: 16 de noviembre de 2023.
- Mohammadzadeh, S., Olya, M. E., Arabi, A. M., Shariati, A., & Khosravi Nikou, M. R. (2015). Synthesis, characterization and application of ZnO-Ag as a nanophotocatalyst for organic compounds degradation, mechanism and economic study. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 35: 194–207. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.03.030>
- Morales, M.E., S. (2020). Método de transferencia de calor. *Transferencia de Calor Máquinas y Equipos Térmicos* [En línea] Disponible en: <https://acortar.link/BycEye>. Fecha de consulta: 7 de noviembre del 2023.
- Mosqueda, M. C. R. (2011). Uso del ZnO en la degradación del triclosan mediante irradiación de luz UV. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. 01, 77: 14-26. Tesis [En línea] Disponible en: <https://acortar.link/80vct2>
- Nagajyothi, P. C., Lim, H., Shim, J., & Rawal, S. B. (2016). Au nanoparticles supported nanoporous ZnO sphere for enhanced photocatalytic activity under UV-Light irradiation. *Journal of Cluster Science*, 27(4): 1159–1170. <https://doi.org/10.1007/s10876-016-0980-4>
- Okemoto, A., Kishishita, K., Maeda, S., Gohda, S., Misaki, M., Koshiha, Y., Ishida, K., Horie, T., Taniya, K., Ichihashi, Y., & Nishiyama, S. (2016). Application of picene thin-film semiconductor as a photocatalyst for photocatalytic hydrogen formation from water. *Applied Catalysis B: Environmental*, 192: 88–92. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.03.028>
- Onna, D. A. (2017). Fotoluminiscencia de nanopartículas en películas delgadas de óxidos mesoestructurados. Departamento de Química Inorgánica, Analítica y Química Física 180: 13-20. Tesis [En línea] Disponible en: <https://acortar.link/kH4SBT>

- Ortega, M. Y., Salinas Gutiérrez, J. M., Guzmán Velderrain, V., Delgado Vigil, M. D., López Ortiz, A., & Collins-Martínez, V. (2011). Semiconductores alternos Al/TiO₂ como fotocatalizadores para la degradación de compuestos orgánicos. *Síntesis y Caracterización de Materiales y Minerales*. [En Línea] Disponible en: <https://acortar.link/44ltfY>. Fecha de consulta: 7 de noviembre de 2023.
- Oslén Jaimes, Rincón Isabel Cristina, & Peña-Pedraza Heriberto. (2018). Correlation method in a ZnO crystal. *Ciencia En Desarrollo*, 9: 57–67. [En línea] Disponible en: <https://acortar.link/UO83ts>. Fecha de consulta: 15 de noviembre del 2023.
- Pawar, R. C., Cho, D., & Lee, C. S. (2013). Fabrication of nanocomposite photocatalysts from zinc oxide nanostructures and reduced graphene oxide. *Current Applied Physics*, 13(4 SUPPL.2): 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2012.12.031>
- Pham, T. T., Nguyen-Huy, C., Lee, H. J., Nguyen-Phan, T. D., Son, T. H., Kim, C. K., & Shin, E. W. (2015). Cu-doped TiO₂/reduced graphene oxide thin-film photocatalysts: Effect of Cu content upon methylene blue removal in water. *Ceramics International*, 41(9): 11184–11193. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.05.068>
- Pirhashemi, M., Habibi-Yangjeh, A., & Rahim Pouran, S. (2018). Review on the criteria anticipated for the fabrication of highly efficient ZnO-based visible-light-driven photocatalysts. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 62: 1–25. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.01.012>
- Ramos Cano, J., González-Zamarripa, G., De Soria Aguilar, M. J., Amézaga Madrid, P., Hurtado Macías, A., González-Hernández, J., & Miki-Yoshida, M. (2013). Síntesis de películas delgadas base Pb-Ti depositadas por el método de CVD-AA, Caracterización Cristalográfica y Microestructural. *Superficies y Vacío*, 26(4): 143–147. Tesis [En línea] Disponible en: <https://acortar.link/TNIBKa>.
- Ravichandran, K., & Sindhuja, E. (2019). Fabrication of cost effective g-C₃N₄+Ag activated ZnO photocatalyst in thin film form for enhanced visible light responsive dye degradation. *Materials Chemistry and Physics*, 221: 203–215. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.09.038>

- Rodriguez Álvarez, A. (2023). Efecto en la actividad fotocatalítica de la inclusión de iones metálicos en microesferas de dióxido de titanio. Posgrado Interinstitucional En Ciencia y Tecnología, 88: 22-34. Tesis [En línea] Disponible en: <https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1002/1285/1/18357.pdf>
- Rosas Chicas, M. (2015). Mecanismos y Cinética de Degradación del Colorante purpurina (1,2,4-trihidroxiantraquinona) en medio acuoso por Radicales Hidroxilo. *División Ciencias Básicas e Ingeniería*, 93: 11-33. [En línea] Disponible en: <http://hdl.handle.net/11191/6898>
- Ruiz, B. F. S. (2008). Síntesis y Caracterización de la Conversión hacia arriba en Nanocristales de ZnO:Er³. Centro de Investigaciones En Óptica A.C., 63: 2-4. <http://hdl.handle.net/11191/6898>
- Ruiz Peralta, M. de L. (2012). Síntesis de nanocompuestos de M/ZnO (M= Ag o Au) por irradiación de microondas. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 113: 7-18. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/items/faecc8b0-2935-4087-9695-e7bd6b8d68d8>
- Seddigi, Z. S., Ahmed, S. A., Ansari, S. P., Yarkandi, N. H., Danish, E., Alkibash, A. A., Oteef, M. D. Y., & Ahmed, S. (2014). The effect of loading palladium on zinc oxide on the photocatalytic degradation of methyl tert-butyl ether (MTBE) in water. *Photochemistry and Photobiology*, 90(3): 491–495. <https://doi.org/10.1111/php.12242>
- Shanmugam, M., Alsalmeh, A., Alghamdi, A., & Jayavel, R. (2016). In-situ microwave synthesis of graphene–TiO₂ nanocomposites with enhanced photocatalytic properties for the degradation of organic pollutants. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 163: 216–223. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2016.08.029>
- Solis, M. A. V. (2016). Oxidación fotocatalítica de derrames de aceite en agua con TiO₂/UV. Maestría En Ingeniería Civil Oxidación, 163: 15-17. Tesis [En línea] Disponible en: <https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/001/374/1/CF-Maestria en Ingeniería Civil-1019040160.pdf>
- Tejada Velásquez, I. Y. (2022). Degradación de colorantes utilizando radiación solar y

- visible mediante fotocatalizadores de Sr_2CeO_4 : xNi. Sustentabilidad de los Recursos Naturales y Energía, 71: 11-12. Tesis [En línea] Disponible en: <https://acortar.link/fQrG0J>.
- Tokumoto, M. S., Briois, V., Santilli, C. V., & Pulcinelli, S. H. (2003). Preparation of ZnO nanoparticles : Structural Study. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 547–551. [En línea] Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1020711702332>. Fecha de consulta: 10 de noviembre del 2023.
- Torres López, C. Y. (2013). Fotocatálisis en nanotubos metaestables de TiO_2 sobre electrodos de Ti para la degradación de naranja de metileno en electroquímica. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico En Electroquímica, 149: 12-22. Tesis [En línea] Disponible en: <https://acortar.link/JydkTA>
- Vanathi, P., Rajiv, P., Narendhran, S., Rajeshwari, S., Rahman, P. K. S. M., & Venckatesh, R. (2014). Biosynthesis and characterization of phyto mediated zinc oxide nanoparticles: A green chemistry approach. *Materials Letters*, 134: 13–15. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.07.029>
- Vilchez, J. M., Morales, A. M., Villalobos, G., Tonda, P., & Garrido, L. (2017). Enlace químico y fuerzas intermoleculares. *ESO 4. Física y Química*, 38–53. [En línea] Disponible en: https://dcb.ingenieria.unam.mx/wpcontent/themes/temperachild/CoordinacionesAcademicas/FQ/Q/Academia/Fzas_intermoleculares_MAJV.pdf. Fecha de consulta: 17 de noviembre del 2023.
- Villagrán Ocádiz, M. A. (2018). Propiedades de ZnO nanoestructurado obtenido por la oxidación térmica de capas de zinc depositadas por CSS. Departamento de Ingeniería Eléctrica, 109: 57–79. Tesis [En línea] Disponible en: <https://repositorio.cinvestav.mx/handle/cinvestav/2854>
- Wang, L., Liu, X. J., Hao, J., & Chu, L. Q. (2015). Long-range surface plasmon resonance sensors fabricated with plasma polymerized fluorocarbon thin films. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 215: 368–372. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.04.005>

- Wang, Z. L. (2004). Zinc oxide nanostructures: Growth, Properties and Applications. *Journal of Physics Condensed Matter*, 16(25), 31: 4-16. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/16/25/R01>
- Yuan, J., Choo, E. S. G., Tang, X., Sheng, Y., Ding, J., & Xue, J. (2010). Synthesis of ZnO-Pt nanoflowers and their photocatalytic applications. *Nanotechnology*, 21(18):185606 <https://doi.org/10.1088/0957-4484/21/18/185606>.
- Zaera, T. (2004). El óxido de Zinc: Crecimiento cristalino mediante transporte en fase gaseosa y caracterización de propiedades físicas. *Departamento de Física Aplicada y Electromagnetismo*, 202: 9-12. [En línea] Disponible en: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/9872/tena.pdf?sequence=1>.
- Zarei, N., & Behnajady, M. A. (2016). Synthesis, characterization, and photocatalytic activity of sol-gel prepared Mg/ZnO nanoparticles. *Desalination and Water Treatment*, 57(36): 16855–16861. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1083479>
- Zhai, H., Wang, L., Sun, D., Han, D., Qi, B., Li, X., Chang, L., & Yang, J. (2015). Direct sunlight responsive Ag-ZnO heterostructure photocatalyst: Enhanced degradation of rhodamine B. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 78: 35–40. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2014.11.004>
- Zheng, Y., Chen, C., Zhan, Y., Lin, X., Zheng, Q., Wei, K., & Zhu, J. (2008). Photocatalytic activity of Ag/ZnO heterostructure nanocatalyst: Correlation between structure and property. *Journal of Physical Chemistry*, 112(29): 10773–10777. <https://doi.org/10.1021/jp8027275>
- Zhou, J., Cheng, Y., & Yu, J. (2011). Preparation and characterization of visible-light-driven plasmonic photocatalyst Ag/AgCl/TiO₂ nanocomposite thin films. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 223(2–3): 82–87. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2011.07.016>

Implicaciones ambientales y toxicológicas de los hidrocarburos aromáticos policíclicos: una revisión

Environmental and toxicological implications of polycyclic aromatic hydrocarbons: a review

Norma Araceli Guel-Najar¹, Aidé Sáenz-Galindo¹, Jorge Carlos Ríos-Hurtado²

¹Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Blvd. Venustiano Carranza y José Cárdenas Valdés, C.P. 25280, Saltillo, Coahuila, México.

²Facultad de Metalurgia, Universidad Autónoma de Coahuila, Carretera 57 Km. 5 Estancias de San Juan Bautista, C.P. 25718, Monclova, Coahuila, México.

Autor de correspondencia: Norma Araceli Guel Najar

normagu@uadec.edu.mx ; 866 6383939

Resumen

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) son un grupo de compuestos formados por dos o más anillos aromáticos. La principal fuente de estos contaminantes se debe a la combustión incompleta de la materia orgánica, como madera y combustibles fósiles (productos derivados del carbón y petróleo). Los HAP son uno de los contaminantes orgánicos persistentes debido a sus propiedades características y su alta presencia en el medio ambiente. Estos contaminantes son una fuente de preocupación debido a sus efectos tóxicos que tienen en la salud humana ya que ninguna persona está exenta de entrar en contacto con estos contaminantes. En este trabajo se revisa la literatura que describe de forma general a los HAP, así como su persistencia en el medio ambiente tanto en aire, agua y el suelo. También se describen las vías de exposición que puede ser por inhalación, ingestión y contacto dérmico (por la piel), además de sus efectos negativos que tiene la exposición a corto y largo plazo que incluyen los efectos teratogénicos, genotóxicos, mutagénicos y cancerígenos que tienen los HAP en el cuerpo humano.

Palabras clave: hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), contaminación, exposición, toxicidad.

Abstract

Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are a group of compounds consisting of two or more aromatic rings. The main source of these pollutants is due to incomplete combustion of organic matter, such as wood and fossil fuels (coal and petroleum products). PAHs are one of the persistent organic pollutants due to characteristic properties and the high presence in the environment. These pollutants are a source of concern due to the toxic effects on human health since no person is exempt to get in contact with these pollutants. This paper reviews the literature describing PAHs in general, as well as persistence in the environment in air, water, and soil. It also describes the exposure routes, such as inhalation, ingestion and dermal contact

(through the skin) and the negative effects of short and long term exposure, including teratogenic, genotoxic, mutagenic and carcinogenic effects of PAHs on the human body.

Keywords: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), pollution, exposure, toxicity.

1. Introducción

Con el transcurso del tiempo, la contaminación ambiental se ha convertido en un serio problema de interés público a nivel mundial. La rápida urbanización e industrialización, ha causado la sobreexplotación de los recursos humanos y el exceso de contaminantes nocivos para los seres vivos. Entre los contaminantes presentes en el medio ambiente se encuentran los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) (Ajibade y col., 2021).

Los HAP son un tipo de sustancias químicas orgánicas, por lo general tóxicas para los seres vivos, que se encuentran de forma persistente en el medio ambiente (Adeniji y col., 2018). Estos contaminantes pueden llegar a los ecosistemas de forma natural o antropogénica, siendo esta última la más frecuente (Adeniji y col., 2018; Wenning y Martello, 2014). Los incendios forestales, desintegración de materia orgánica, erupciones volcánicas, hongos, bacterias y plantas clorofilas son ejemplos de fuentes naturales. Mientras que derrames de petróleo, incineración de desechos, energía eléctrica, descargas de aguas residuales tratadas, refinerías químicas, producción de gas, entre muchas otras, son ejemplos de fuentes antropogénicas (Brazkova y Krastanov, 2013; Stamatelatos y col., 2011).

La atmósfera es la principal fuente de propagación de los HAP. Los contaminantes se encuentran en estado gaseoso o adsorbidos en partículas. Las corrientes de aire los transportan y dispersan a diferentes áreas depositándolos en el agua y suelo. Los compuestos presentes en el suelo son transportados por agua de lluvia a mares

y ríos. En los ecosistemas acuáticos, los contaminantes ingresan a los peces, plantas marinas y organismos sedentarios. Por consiguiente, los HAP son considerados contaminantes persistentes (Gachanja, 2005; Stamatelatou y col., 2011; Wang y col., 2013).

La presencia de HAP en el medio ambiente representa graves problemas de salud y de calidad de vida, tanto para los seres humanos como para cualquier ser vivo (Maria Florencia y col., 2022; Munyengabe y col., 2022). Por lo que la remoción de contaminantes de los ecosistemas es de suma importancia dado que tienen la capacidad de bioacumularse y a los peligros que representan para los seres vivos (Adeola y Forbes, 2021). Es por ello que, se emplean una gran variedad de técnicas de remediación con distintos grados de efectividad, que incluyen tecnologías químicas, físicas, y biológicas. Algunos de los tratamientos empleados son adsorción, degradación fotocatalítica, biorremediación, fitorremediación, uso de biorreactores, tecnología de membranas y coagulación (Adeola y Forbes, 2021; Kuppusamy y col., 2017; Patel y col., 2020; Smol y Włodarczyk-Makula, 2017).

Esta revisión tiene como objetivo brindar una descripción general de los HAP, incluidas sus implicaciones ambientales, toxicidad y sus efectos nocivos en la salud.

2. Hidrocarburos aromáticos policíclicos

Los HAP son subproductos generados de un proceso incompleto de combustión de material carbonoso (Y. Zhang y col., 2019). Se componen de átomos de hidrógeno y carbono en forma de dos o más anillos aromáticos unidos, distribuidos de forma lineal, angular o agrupados (Adeniji y col., 2018; Jesus y col., 2022). Son principalmente compuestos sólidos incoloros, amarillos verdosos pálidos o blancos. Se caracterizan por poseer altos puntos de fusión y ebullición, baja presión de vapor, baja solubilidad en agua y una alta solubilidad en disolventes orgánicos porque son




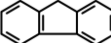
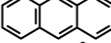

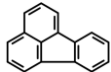
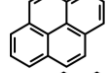
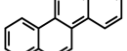
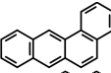
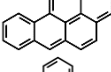
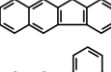
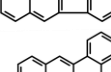
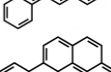
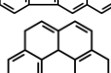
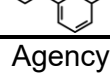
altamente lipófilos. La solubilidad en el agua disminuye con cada anillo extra (Esmailbeig y col., 2023; Patel y col., 2020).

Los HAP se clasifican en base a la cantidad de anillos presentes y a su peso molecular. Los de bajo peso molecular se componen de dos y tres anillos de benceno y están presentes en la atmósfera principalmente en fase de vapor. Los de alto peso molecular con más de 3 anillos se encuentran mayormente unidos a partículas (Choi y col., 2010; Kuppusamy y col., 2016).

Otra clasificación de los HAP es en base a las principales fuentes que conducen a su formación: pirogénicas, petrogénicas y diagenéticas. Los HAP pirogénicos se producen a partir de pirólisis, que consiste en calentar a altas temperaturas los compuestos orgánicos en condiciones limitadas de oxígeno, por ejemplo, incendios forestales, emisiones industriales, emisiones vehiculares, combustión de madera. Los petrogénicos se producen naturalmente a lo largo de millones de años debido a la maduración del petróleo crudo y sus productos. La contaminación se produce a causa de la producción del petróleo y a los derrames. Finalmente los diagenéticos se forman espontáneamente como producto de transformaciones de fuentes naturales, pueden ser sintetizados por plantas y bacterias, producirse por procesos de degradación o por erupción volcánica (Esmailbeig y col., 2023; Hąc-Wydro y col., 2019; Ifegwu y Anyakora, 2015; Jesus y col., 2022).

Se conocen varios cientos de HAP y compuestos relacionados, que varían en el número de anillos que contienen (Izzotti y Pulliero, 2014; Menichini y Bocca, 2003). Sin embargo, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés) solo consideró 16 como prioritarios, debido a su actividad mutagénica y cancerígena, además de que hay más información sobre ellos y las personas tienen mayor posibilidad de exposición. Estos HAP persistentes en el medio ambiente son de origen pirogénico y se muestran en la Tabla 1 (García-Jares y col., 2012; Huang y Penning, 2014; Ifegwu y Anyakora, 2015).

Tabla 1. 16 HAP como contaminantes prioritarios de acuerdo con la USEPA. Fuente: creación propia a partir de (Ghosal y col., 2016; Jesus y col., 2022; Patel y col., 2020; Smol y Włodarczyk-Makula, 2017).

HAP	Fórmula	Estructura	No. de anillos	Peso molecular (g/mol)	Solubilidad en agua a 25°C (mg/L)	Toxicidad según la IARC
Naftaleno	C ₁₀ H ₈		2	128.17	31	2B
Acenaftileno	C ₁₂ H ₈		3	152.20	16.1	3
Acenafteno	C ₁₂ H ₁₀		3	154.21	3.8	3
Fluoreno	C ₁₃ H ₁₀		3	166.22	1.9	3
Antraceno	C ₁₄ H ₁₀		3	178.23	0.045	3
Fenantreno	C ₁₄ H ₁₀		3	178.23	1.1	3
Fluoranteno	C ₁₆ H ₁₀		4	202.26	0.26	3
Pireno	C ₁₆ H ₁₀		4	202.26	0.132	3
Criseno	C ₁₈ H ₁₂		4	228.29	0.0015	2B
Benzo[a]antraceno	C ₂₀ H ₁₂		4	228.29	0.011	2B
Benzo[a]pireno	C ₂₀ H ₁₂		5	252.32	0.0038	1
Benzo[b]fluoranteno	C ₂₀ H ₁₂		5	252.32	0.0015	2B
Benzo[k]fluoranteno	C ₂₀ H ₁₂		5	252.32	0.0008	2B
Dibenzo[a,h]antraceno	C ₂₂ H ₁₄		5	278.35	0.0005	2A
Indeno[1,2,3-cd]pireno	C ₂₂ H ₁₂		6	276.34	0.062	2B
Benzo[g,h,i]perileno	C ₂₂ H ₁₂		6	276.34	0.00026	3

Toxicidad según la International Agency for Research on Cancer (IARC): grupo 1; cancerígeno para los humanos, grupo 2A; probablemente cancerígeno para los humanos,

grupo 2B; posiblemente cancerígeno para los humanos y grupo 3; no clasificable como cancerígeno en humanos.

Cuando el peso molecular de los HAP aumenta, se eleva la carcinogenicidad, la teratogenicidad (malformaciones en recién nacidos) y la mutagenicidad, por otro lado disminuye la toxicidad aguda (Kurwadkar y col., 2022; Ravindra y col., 2008). El Benzo[a]pireno (B[a]P) fue el primer carcinógeno descubierto y se utiliza generalmente como indicador de exposición a HAP en estudios medioambientales (García-Jares y col., 2012; Ravindra y col., 2008).

3. Persistencia en el medio ambiente

Los HAP son compuestos estables, resistentes, de difícil degradación y persistentes en el medio ambiente (Sakshi y col., 2019). Una vez que son liberados a la atmósfera, además de aumentar la contaminación atmosférica, se transportan a través del aire y se acumulan en el agua y el suelo causando daños ambientales. Los principales procesos de propagación de HAP son aire-agua y aire-suelo (Qi y col., 2023). El desplazamiento de los HAP a través de los recursos naturales depende de las propiedades de cada uno de los compuestos (ATSDR, 2016).

3.1. HAP en el aire

Los HAP se transportan en el aire a través de partículas suspendidas en la atmósfera. Los compuestos unidos a partículas gruesas tienen una vida más corta en las masas de aire. Por otra parte, los unidos a partículas finas pueden viajar largas distancias llegando a lugares remotos (L. Zhang y col., 2020).

Los HAP de bajo peso molecular se encuentran principalmente en forma de gas en la atmósfera. Debido a las altas concentraciones de HAP de bajo peso molecular, estos tienden a ser los contaminantes dominantes unidos a partículas. La cantidad concerniente de los compuestos adheridos se ve afectada por la temperatura. Los

HAP en las partículas es mayor en el invierno, debido a que los contaminantes más volátiles se evaporan en mayor cantidad (Låg y col., 2020; L. Zhang y col., 2020).

Las actividades antropogénicas (principalmente emisiones vehiculares y domésticas) en zonas urbanas pueden causar concentraciones muy elevadas de HAP en el aire en comparación a entornos rurales (Jang y col., 2013; Ravindra y col., 2008). Los procesos de combustión (como fogatas, tabaco, fuegos artificiales, cocina a gas y motor de combustión interna) son la fuente principal de dispersar los HAP en la atmósfera. El transporte vehicular contribuye aproximadamente en un 60% de las emisiones totales de HAP en zonas urbanas (Quijano Parra y col., 2017). Otras de las fuentes de HAP en el aire son las emisiones del transporte marítimo, actividades relacionadas con el petróleo y el gas, emisiones industriales y la incineración de residuos (Akhbarizadeh y col., 2021).

3.2. HAP en el agua

La contaminación de los ambientes acuáticos por HAP se debe a la precipitación atmosférica (lluvia), escorrentía de las aceras y la tierra, aguas pluviales, descarga de aguas residuales y las fugas de petróleo (Hussain y col., 2015). Estos se encuentran con frecuencia a mayores concentraciones en aguas costeras y menos profundas, especialmente en áreas cercanas a zonas urbanas (López-Berenguer y col., 2023).

Las propiedades físicas de los HAP juegan un papel importante en la contaminación del agua. Los HAP repelen el agua (hidrofóbicos) y se encuentran principalmente en los sedimentos. La unión de los HAP a las partículas sólidas hace más difícil la degradación mediante oxidación fotoquímica y biológica, por lo que tienden a persistir más tiempo en el medio acuático. Estos causan una acumulación de contaminantes en altas concentraciones generalmente de HAP de alto peso molecular. Sin embargo, cuando se reduce el número de anillos unidos, disminuye

la presión de vapor, dando como resultado una mayor adsorción de HAP en el agua (Felemban y col., 2019; Hussain y col., 2015).

Los HAP tienen una alta solubilidad en lípidos o grasas, ocasionando la transferencia de contaminantes a la cadena alimenticia acuática. Los animales invertebrados poseen una menor capacidad para metabolizar los compuestos, mientras que los vertebrados son capaces de metabolizarlos eficientemente. Generalmente los animales vertebrados tienen la capacidad de degradar rápidamente los HAP en compuestos más solubles en agua, causando una serie de efectos tóxicos en la biota del lugar. Principalmente en los vertebrados, ocasionan efectos citotóxicos (daño o muerte de células o tejidos), cancerígenos, inmunológicos y reproductivos (López-Berenguer y col., 2023). Debido a la acumulación de HAP en los organismos acuáticos, el consumidor de alimentos marinos puede contraer riesgos en su salud (Adewale y col., 2022; Ranjbar Jafarabadi y col., 2020).

3.3. HAP en el suelo

La contaminación del suelo por HAP se debe principalmente a los procesos de deposición húmeda o seca ocasionados por los contaminantes en la atmósfera. La alta capacidad de las partículas sólidas del suelo para adherir a los HAP hace que sea considerado el principal contenedor de estos contaminantes, llegando a afectar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Los HAP alteran la capacidad de retención de agua del suelo, alteran el tamaño de las partículas, la porosidad y afecta negativamente a la población de microbios (Deelaman y col., 2021; Sakshi y col., 2019; Song y col., 2022).

Los efectos provocados por los HAP se regulan en base a ciertos parámetros del suelo como el tamaño de grano de las partículas del suelo, el carbono orgánico asociado y el pH. La unión de los HAP se produce principalmente en tamaños de

partículas finas (limo y arcilla). Estas partículas finas presentan baja movilidad de los contaminantes adheridos y alta durabilidad, que da como resultado efectos a largo plazo y una toxicidad persistente (Błońska y Lasota, 2023; Sakshi y col., 2019).

La absorción y encapsulación de los HAP por los minerales y la materia orgánica del suelo se deben principalmente a sus características lipófilas (afinidad por los lípidos) y semivolátiles (Mazarji y col., 2021). Los HAP de bajo peso molecular son volátiles y no presentan alta resistencia a los ataques microbianos. Por el contrario, los HAP de alto peso molecular se absorben fuertemente a la materia orgánica del suelo y son más resistentes al ataque de microbios (Madrid y col., 2022).

Los hongos, actinomicetos y bacterias metanotróficas son ejemplos de microorganismos del suelo que tienen la capacidad de degradar a los HAP. Sin embargo, los microbios son vulnerables a estos contaminantes (Picariello y col., 2020). La actividad enzimática y microbiana del suelo, así como la diversidad microbiana se ve afectada negativamente (disminuye) a altas concentraciones de HAP debido a su toxicidad, provocando una menor capacidad de autopurificación (Picariello y col., 2020; Sakshi y col., 2019).

4. Exposición humana a los HAP

Los HAP son omnipresentes en el medio ambiente por lo que es inevitable la exposición humana a estos contaminantes. Los HAP se encuentran en mezclas complejas de diferentes compuestos, por lo que la exposición a un solo HAP no es muy frecuente. La exposición a mezclas de contaminantes con HAP es constante y puede ocurrir de numerosas formas, las principales vías incluyen inhalación, ingestión y contacto dérmico tanto en ambientes ocupacionales como no ocupacionales. También se puede estar expuesto a más de una vía simultáneamente aumentando la dosis total absorbida (Gad y Gad, 2014; Huang y Penning, 2014).

El biomarcador (sustancia que se puede medir en el organismo) más empleado para medir la dosis interna total de intoxicación humana por los HAP y sus mezclas es el nivel de metabolitos en orina, incluidos 1-hidroxipireno (1-HP), hidroxifenantrenos e hidroxinaftaleno (Balciroğlu, 2016; Hao y Yan, 2017). El 1-HP urinario puede indicar las fuentes posibles de exposición (aire, agua y ambiente) y las vías de exposición, así como la dosis total en el organismo (Hao y Yan, 2017).

La exposición por inhalación ocurre al respirar aire ambiental y aire interior contaminado. La inhalación de aire ambiental contaminado es mayor en zonas urbanas debido a la mayor cantidad de población. Existe un aumento de los gases de escape del tráfico vehicular y de generadores, polvo de la carretera, humo de cigarro y tabaco, emisiones industriales, gases de sitios de desechos peligrosos, incendios, quema de material orgánico (carbono y madera), quema de desechos e incineradores municipales (Ifegwu y Anyakora, 2015; Okoro y col., 2020; Srogi, 2007). La mayor contaminación por inhalación ocurre en interiores ya que la mayor parte de la población pasa aproximadamente el 90% de su tiempo en ellos. Los HAP contaminan el ambiente interior debido a la calefacción doméstica, chimeneas, el uso de combustibles fósiles para cocinar y partículas inhalables ($PM_{2.5}$, diámetro $<2.5\mu m$) provenientes del exterior (Srogi, 2007).

La contaminación por ingestión se debe al consumo involuntario de alimentos que contienen HAP. Los alimentos se contaminan principalmente por las técnicas de preparación como asar a la parrilla, freír y al vapor (especialmente la carne y productos cárnicos) y el procesamiento de alimentos como secar y ahumar (Huang y Penning, 2014). Por otra parte, los cultivos (como cereales, frutas y verduras) y plantas generalmente se contaminan por la deposición atmosférica o por suelos contaminados. Algunos cultivos como el centeno, lentejas, y el trigo pueden absorber o sintetizar a los HAP (Abdel-Shafy y Mansour, 2016; Huang y Penning, 2014). Cuando las plantas contaminadas son consumidas por los rebaños (como

vacas y cabras) pueden terminar en los productos lácteos como leche, mantequilla, queso y nata (Huang y Penning, 2014).

El agua potable puede estar contaminada con HAP por vertidos de efluentes industriales o al uso de tuberías de hulla en el suministro de agua (Deelaman y col., 2021; Srogi, 2007). Asimismo, los océanos, lagos y arroyos se contaminan por HAP a través de deposición atmosférica, efluentes industriales, escorrentías urbanas, efluentes municipales, derrames o fugas de petróleo. Esta contaminación provoca que los pescados y mariscos se contaminen (Huang y Penning, 2014; Srogi, 2007). En algunos casos la contaminación de alimentos por HAP se debe a que el material de embalaje está contaminado (Huang y Penning, 2014).

La exposición por contacto dérmico se debe al contacto de la piel con partículas del suelo contaminado con altos niveles de HAP, tal como sitios cercanos al vertido de desechos peligrosos, o al entrar en contacto con sustancias que contienen HAP como aceite de motor o creosota (sustancia utilizada como conservador de madera). De igual manera, algunos contaminantes entran en contacto con la piel a través de medicamentos que contienen HAP para tratar algunas enfermedades como la psoriasis, el eccema y algunas dermatitis (Agudo, 2009; ATSDR, 2016; Ifegwu y Anyakora, 2015).

Las exposiciones ocupacionales ocurren en el lugar de trabajo. Las personas realizan sus actividades diarias en entornos con grandes concentraciones de HAP. La exposición sucede generalmente por inhalación de gases o partículas con HAP adsorbidos, o por contacto dérmico al manipular sustancias que contienen HAP (Agudo, 2009; Okoro y col., 2020). Algunas de las industrias y ocupaciones con mayor exposición de sus trabajadores a HAP son los trabajos con asfalto (fabricación y uso), la producción de coque, refinación de petróleo, producción de derivados del petróleo, gasificación de carbón, fundición, remediación de suelos, minería, industria metalúrgica, siderurgia, fábricas de aluminio, industria de la goma

y el caucho, fabricación de electrodos de carbón y negro de humo, incineración de residuos, mecánicos, bomberos, vendedores ambulantes y ahumadores de alimentos (Agudo, 2009; Ifegwu y Anyakora, 2015; Lawal, 2017; Unwin y col., 2006).

5. Efectos toxicológicos de los HAP

Los HAP y sus derivados son tóxicos para los seres humanos. A medida que aumenta el peso molecular de los distintos HAP aumenta su toxicidad y los efectos negativos en la salud humana (Adeniji y col., 2018; Hesham y col., 2012; Kim y col., 2013). Después de la exposición con los HAP, estos entran al organismo humano y se dispersan en los diferentes tejidos, especialmente en el tejido adiposo (grasa corporal) y los órganos, principalmente los pulmones y la piel. Sus efectos en la salud varían de acuerdo con diversos factores, como el tipo de HAP, la forma de exposición (inhalación, ingestión o contacto dérmico), la duración de exposición (agudo o crónico), la edad y el sexo de la persona (Stamatelatou y col., 2011). La mayor parte de los HAP no se acumulan en el organismo, sino que son metabolizados por el hígado y los riñones, y posteriormente desechados a los pocos días de su exposición, generalmente por las heces y la orina (Agudo, 2009; ATSDR, 2016). En contraste con los adultos, los niños respiran más aire (que puede estar contaminado) por unidad de masa corporal, y la eficacia de desintoxicación en sus cuerpos es más baja. Por lo tanto, eso ocasiona que los niños sean más susceptibles a sufrir los efectos de la exposición a contaminantes (Goldstein y col., 2011).

5.1. Efectos agudos sobre la salud

Los efectos agudos o a corto plazo sobre la salud se deben a la exposición de altas concentraciones de mezclas de contaminantes que contienen HAP (Abdel-Shafy y

Mansour, 2016; Lawal, 2017). Las mezclas que contienen HAP producen síntomas como náuseas, diarrea, irritación ocular, vómitos, confusión y supresión del sistema nervioso central (Gad y Gad, 2014; Kim y col., 2013). Por otra parte, según la forma de exposición, puede causar diversas afecciones. Por inhalación afectan principalmente la salud pulmonar que incluye enfermedades como asma y EPOC (enfermedad pulmonar obstructiva crónica) (Ogbunuzor y col., 2023). Por contacto dérmico, los HAP atraviesan la barrera de la piel ocasionando enfermedades inflamatorias en la piel como eczema, psoriasis, dermatitis atópica y de contacto, envejecimiento de la piel y acné (Sousa y col., 2022). La fotosensibilidad de los ojos y de la piel puede ser causada por exposición por inhalación o dérmica (Gad y Gad, 2014). En la Figura 1, se muestran los efectos agudos ocasionados por la exposición a los HAP.

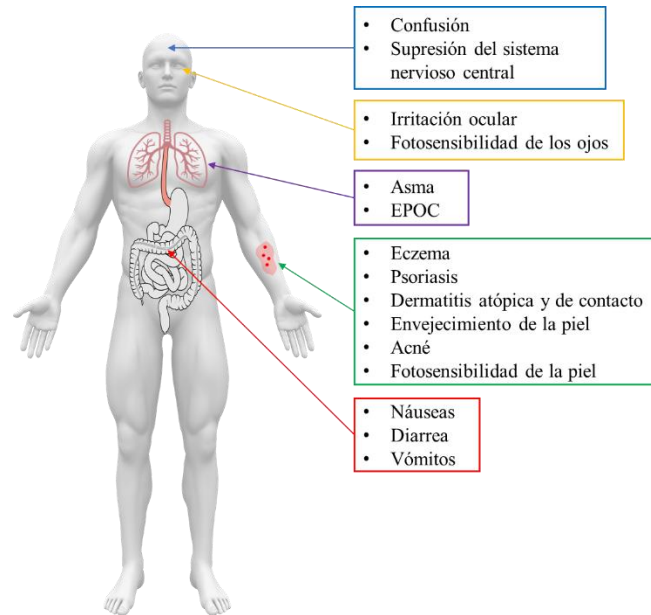


Figura 1. Efectos agudos ocasionados por la exposición a HAP.

Debido a las mezclas de contaminantes no se sabe con seguridad que componentes de la mezcla ocasionan estos efectos, ya que los otros compuestos que se encuentran comúnmente en los HAP pueden ser los causantes de los síntomas. Se conoce que el B[a]P, el antraceno y el naftaleno son irritantes para la piel y que los dos primeros la hacen sensible (causan una respuesta alérgica) (Rengarajan y col., 2015).

5.2. Efectos crónicos sobre la salud

Los efectos crónicos o a largo plazo se deben a la exposición prolongada con los HAP. Esta exposición ocasiona problemas respiratorios, anomalías en las funciones pulmonares, síntomas similares al asma, cataratas, anomalías del sistema reproductivo, disminución de la inmunidad, cáncer gastrointestinal e ictericia que puede ser causada por daño hepático o renal (Deelaman y col., 2021; Kuppusamy y col., 2020). La exposición al naftaleno en altas concentraciones ya sea inhalado o ingerido puede ocasionar la degradación de los glóbulos rojos (Kuppusamy y col., 2020; Rengarajan y col., 2015).

Los HAP son biológicamente inertes, cuando se activan metabólicamente a intermediarios biológicamente reactivos que modifican el ácido desoxirribonucleico (ADN), forman un aducto que es un complejo de una sustancia química con una molécula biológica (HAP-ADN) que puede ocasionar mutaciones y genera efectos teratogénicos, genotóxicos/mutagénicos y cancerígenos como se ilustra en la Figura 2 (Huang y Penning, 2014).

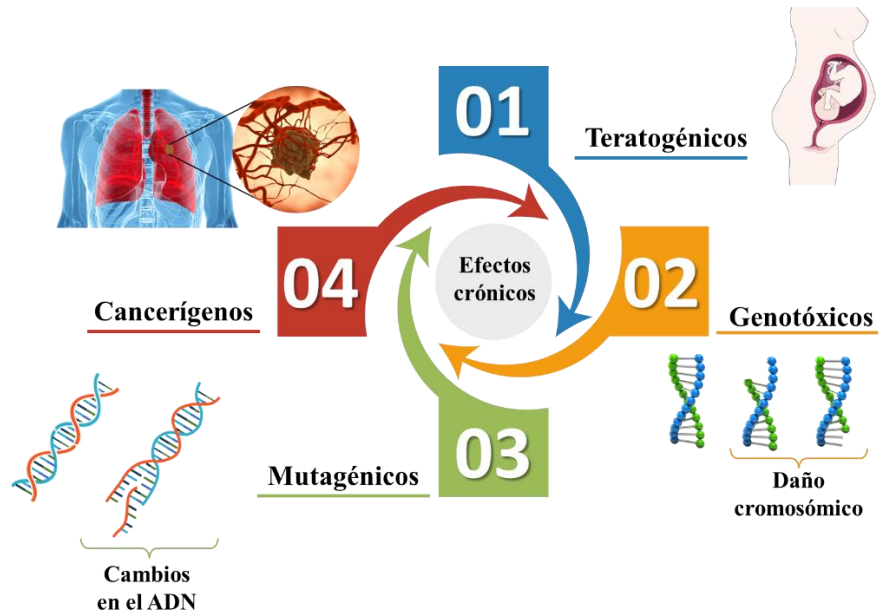


Figura 2. Efectos crónicos ocasionados por la exposición a HAP.

5.2.1. Efectos teratogénicos

La teratogenicidad es la capacidad potencial de producir anomalías estructurales o funcionales al feto o al niño después del nacimiento (McElhatton, 1999). Los HAP pueden entrar en contacto con la sangre de las mujeres embarazadas, cruzan la barrera de la placenta hacia el feto causando efectos negativos en la salud fetal e infantil y eventualmente causar enfermedades crónicas en la edad adulta. Los HAP en el útero retrasan el crecimiento intrauterino, aumentan el riesgo de parto prematuro, afectan negativamente los resultados del nacimiento, causan menor peso al nacer que se asocia con riesgos de mortalidad fetal o neonatal, menor tamaño del recién nacido, menor circunferencia de la cabeza, y reducen el desarrollo cognitivo (Choi y col., 2006; Dai y col., 2023; Y. Guo y col., 2012). La leche materna, que es la principal fuente de nutrientes y anticuerpos beneficiosos

en los recién nacidos y lactantes, es la fuente más común de exposición de HAP en los primeros meses de vida (Drwal y col., 2019).

Las consecuencias de la exposición maternal de los HAP en los niños incluyen mortalidad, disfunción pulmonar, enfermedades respiratorias, infecciones respiratorias, asma, obesidad y efectos neurotóxicos (problemas de desarrollo neurológico, menor inteligencia, problemas de conducta, ansiedad y depresión). En los adultos incluye una mayor resistencia a la insulina, presión arterial, enfermedades del corazón, obesidad adulta, diabetes, depresión y cáncer (Drwal y col., 2019).

5.2.2. Efectos genotóxicos y mutagénicos

La genotoxicidad se refiere a la capacidad de un agente de dañar el ADN y cromosomas de las células (Phillips y Arlt, 2009). La acción genotóxica de los HAP generalmente necesita activarse metabólicamente por epóxidos (compuestos intermedios que se forman en el proceso de eliminación de los HAP), los cuales también reaccionan con el ADN (Gad y Gad, 2014). Se pueden presentar alteraciones cromosómicas estructurales, principalmente desequilibrios cromosómicos y un mecanismo de reparación del ADN deteriorado (Kuppusamy y col., 2020). Los HAP tienen efectos genotóxicos en los espermatozoides. Los metabolitos de los HAP tienen una relación negativa con la concentración, el volumen, la morfología, la movilidad y la degeneración del ADN de los espermatozoides provocando la infertilidad masculina. La exposición al naftaleno y fenantreno reduce la calidad del esperma (Kakavandi y col., 2023).

Se ha reportado que las mujeres son más susceptibles al daño cromosómico y al estrés oxidativo provocados por los HAP en comparación a los hombres en condiciones de exposición similar o igual. Esto se puede atribuir a que las mujeres presentan una alta actividad de la enzima citocromo P450 que produce niveles más

altos de aductos de ADN. Además las mujeres presentan una menor capacidad de reparación del ADN (H. Guo y col., 2014; Sun y col., 2021).

El B[a]P al unirse al receptor de aril hidrocarburo se metaboliza y se desintoxica. Sin embargo también se generan intermediarios genotóxicos muy reactivos que pueden provocar la muerte celular (Dilger y col., 2016). Además, la genotoxicidad influye en el proceso de carcinogenicidad (Rengarajan y col., 2015).

La mutagenicidad es la capacidad que tiene un agente (mutágeno) de realizar cambios en la cantidad o estructura del material genético de células que pueden ser transmisibles y permanentes (Sundar y col., 2018). Algunos de los HAP que entran en el organismo se unen al ADN y tienen la capacidad de generar mutaciones y una variedad de alteraciones cromosómicas (Abdel-Shafy y Mansour, 2016). Probablemente algunos HAP causan mutaciones en diversos genes que ayudan al desarrollo del cáncer. El B[a]P provoca cáncer mediante un mecanismo mutagénico. Se han encontrado aductos de ADN-B[a]P en tejidos pulmonares (Choi y col., 2010).

Las partículas suspendidas en el aire interior y exterior contaminadas con HAP son más mutagénicas que el polvo domestico sedimentario seguido de los suelos contaminados (Choi y col., 2010).

5.2.3. Efectos cancerígenos

La carcinogenicidad es la habilidad de causar cáncer (crecimiento descontrolado de células) (Gerba, 2019). Los HAP activados que reaccionan con el ADN generan alteraciones bioquímicas y daño celular resultando en mutaciones, malformaciones del desarrollo, tumores y cáncer. Estudios ocupacionales en trabajadores expuestos a mezclas que contienen HAP indican que las mezclas de HAP son cancerígenas para los humanos (Rengarajan y col., 2015). Se ha demostrado que existe un mayor

riesgo de cánceres de piel y pulmón, seguidos de vejiga y gastrointestinal (Abdel-Shafy y Mansour, 2016).

Uno de los causantes del cáncer de pulmón es la exposición al humo del tabaco. El B[a]P es el HAP más común que se encuentra en el humo del tabaco, de acuerdo con la IARC el B[a]P es el HAP más cancerígeno. Por si solo el B[a]P no reacciona con el ADN por lo que para volverse mutagénico debe sufrir una activación metabólica (aductos HAP- ADN) (Abedin y col., 2013). Por otra parte, debido a la inflamación causada por la exposición a los HAP, los trabajadores del aluminio pueden condicionarse a defectos en el gen de reparación del ADN, provocando el riesgo de desarrollar cáncer de pulmón (Moubarz y col., 2023).

Los HAP pueden penetrar en la piel a través de los folículos pilosos y por vía transepidérmica (a través de la piel). Estos en conjunto con los rayos UVA pueden generar fotodaño en la piel, ocasionando un envejecimiento prematuro, además pueden desempeñar un papel fundamental en el cáncer de piel (Abolhasani y col., 2021; Sosa y Zalts, 2012).

Se ha reportado que la exposición prolongada y la alta exposición acumulada al benceno pueden estar relacionadas con un riesgo mayor de cáncer de vejiga. Aun así debido a las mezclas de contaminantes de HAP no es posible determinar si este cáncer se puede atribuir únicamente al benceno, o a otros HAP (Shala y col., 2023). Por otra parte, hay evidencia de que la orina de los consumidores de cigarrillos electrónicos contiene carcinógenos, de los cuales algunos de ellos están vinculados con el cáncer de vejiga (Bjurlin y col., 2021).

6. Conclusión

Esta revisión presenta la literatura sobre la amplia distribución de los HAP en el medio ambiente a causa del rápido crecimiento de la población, la urbanización e

industrialización. A pesar de que los HAP se forman de manera natural, estos se distribuyen en el medio ambiente debido a la acción del hombre, principalmente por la producción de productos derivados del petróleo. La exposición a estos contaminantes es muy variada y prácticamente realizar cualquier actividad es sinónimo de exposición a estos contaminantes. Sin embargo, las exposiciones ocupacionales, afectan gravemente la salud de los trabajadores ya que se exponen a tiempos prolongados y a concentraciones elevadas de mezclas de contaminantes que contienen HAP que son más nocivas que los HAP solos. Los efectos en la salud humana de estos contaminantes pueden ser muy peligrosos. La mayor parte de las investigaciones se centran en los efectos carcinógenos de los HAP; sin embargo, también pueden causar efectos teratogénicos, genotóxicos y mutagénicos. Es por ello que es indispensable la búsqueda de tecnologías eficaces para la remoción de estos contaminantes en el medio ambiente.

7. Referencias

- Abdel-Shafy, H. I., y Mansour, M. S. M. (2016). A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation. *Egyptian Journal of Petroleum*. 25(1): 107–123. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.03.011>
- Abedin, Z., Louis-Juste, M., Stangl, M., y Field, J. (2013). The role of base excision repair genes OGG1, APN1 and APN2 in benzo[a]pyrene-7,8-dione induced p53 mutagenesis. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*. 750(1–2): 121–128. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2012.10.003>
- Abolhasani, R., Araghi, F., Tabary, M., Aryannejad, A., Mashinchi, B., y Robati, R. M. (2021). The impact of air pollution on skin and related disorders: A comprehensive review. *Dermatologic Therapy*. 34(2): 1–11. <https://doi.org/10.1111/dth.14840>

Adeniji, A. O., Okoh, O. O., y Okoh, A. I. (2018). Analytical Methods for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and their Global Trend of Distribution in Water and Sediment: A Review. En *Recent Insights in Petroleum Science and Engineering* (pp. 393–428). InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.71163>

Adeola, A. O., y Forbes, P. B. C. (2021). Advances in water treatment technologies for removal of polycyclic aromatic hydrocarbons: Existing concepts, emerging trends, and future prospects. *Water Environment Research*. 93(3): 343–359. <https://doi.org/10.1002/wer.1420>

Adewale, A., Adegbola, P. I., Owoade, A. O., y Aborisade, A. B. (2022). Fish as a bioindicator of polycyclic aromatic hydrocarbon pollution in aquatic ecosystem of Ogun and Eleyele Rivers, Nigeria, and risk assessment for consumer's health. *Journal of Hazardous Materials Advances*. 7: 100096. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100096>

Agudo, A. (2009). Los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP): Acercamiento a su problemática como riesgo laboral. En *Secretaria de Salud y medio ambiente MCA-UGT*.

Ajibade, F. O., Adelodun, B., Lasisi, K. H., Fadare, O. O., Ajibade, T. F., Nwogwu, N. A., Sulaymon, I. D., Ugya, A. Y., Wang, H. C., y Wang, A. (2021). Environmental pollution and their socioeconomic impacts. En *Microbe Mediated Remediation of Environmental Contaminants* (pp. 321–354). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821199-1.00025-0>

Akhbarizadeh, R., Dobaradaran, S., Amouei Torkmahalleh, M., Saeedi, R., Aibaghi, R., y Faraji Ghasemi, F. (2021). Suspended fine particulate matter (PM_{2.5}), microplastics (MPs), and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in air: Their possible relationships and health implications. *Environmental Research*. 192: 110339. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110339>

ATSDR. (2016). Resumen de Salud Pública: Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) [Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PHA)]. [En línea]. Disponible en: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs69.html

Balcioğlu, E. B. (2016). Potential effects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in marine foods on human health: a critical review. *Toxin Reviews*. 35(3–4): 98–105. <https://doi.org/10.1080/15569543.2016.1201513>

Bjurlin, M. A., Matulewicz, R. S., Roberts, T. R., Dearing, B. A., Schatz, D., Sherman, S., Gordon, T., y Shahawy, O. El. (2021). Carcinogen Biomarkers in the Urine of Electronic Cigarette Users and Implications for the Development of Bladder Cancer: A Systematic Review. *European Urology Oncology*. 4(5): 766–783. <https://doi.org/10.1016/j.euo.2020.02.004>

Błońska, E., y Lasota, J. (2023). How decaying wood affects the accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil of temperate mountain forest. *Environmental Research*. 223: 115487. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115487>

Brazkova, M., y Krastanov, A. (2013). Polycyclic aromatic hydrocarbons : Sources , effects and biodegradation. *Proceedings of the International Scientific Conference of University of Ruse*. 52: 52–56.

Choi, H., Harrison, R., Komulainen, H., y Saborit, J. M. D. (2010). Polycyclic aromatic hydrocarbons. En *WHO Guidelines for Indoor Air Quality: Selected Pollutants* (p. 484).

Choi, H., Jedrychowski, W., Spengler, J., Camann, D. E., Whyatt, R. M., Rauh, V., Tsai, W.-Y., y Perera, F. P. (2006). International Studies of Prenatal Exposure to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Fetal Growth. *Environmental Health Perspectives*. 114(11): 1744–1750. <https://doi.org/10.1289/ehp.8982>

Dai, Y., Xu, X., Huo, X., y Faas, M. M. (2023). Effects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) on pregnancy, placenta, and placental trophoblasts. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 262: 115314. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115314>

Deelaman, W., Pongpiachan, S., Tipmanee, D., Choochuay, C., Suttinun, O., Charoenkalunyuta, T., y Promdee, K. (2021). Ecotoxicological risk and health risk characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in terrestrial soils of King George Island, Antarctica. *Polar Science*. 29: 100715. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2021.100715>

Dilger, M., Orasche, J., Zimmermann, R., Paur, H.-R., Diabaté, S., y Weiss, C. (2016). Toxicity of wood smoke particles in human A549 lung epithelial cells: the role of PAHs, soot and zinc. *Archives of Toxicology*. 90(12): 3029–3044. <https://doi.org/10.1007/s00204-016-1659-1>

Drwal, E., Rak, A., y Gregoraszcuk, E. L. (2019). Review: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)—Action on placental function and health risks in future life of newborns. *Toxicology*. 411: 133–142. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2018.10.003>

Esmailbeig, M. A., Khorram, M., Koleini, M. M., Ayatollahi, S., y Zolghadr, A. R. (2023). On the protonated forms of alkyl-bonded polycyclic aromatic heterocycles: Structure prediction and characterization using density functional theory. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 175: 111181. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2022.111181>

Felemban, S., Vazquez, P., y Moore, E. (2019). Future Trends for In Situ Monitoring of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Sources: The Role of Immunosensing Techniques. *Biosensors*. 9(4): 142. <https://doi.org/10.3390/bios9040142>

Gachanja, A. N. (2005). Polycyclic aromatic hydrocarbons | Environmental Applications. En *Encyclopedia of Analytical Science* (Vol. 1469, pp. 234–242). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-369397-7/00474-X>

Gad, S. C., y Gad, S. E. (2014). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs). En *Encyclopedia of Toxicology* (Third Edit, Vol. 3, pp. 1040–1042). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00911-8>

Garcia-Jares, C., Barro, R., y Llompart, M. (2012). Indoor Air Sampling. En *Comprehensive Sampling and Sample Preparation* (Vol. 1, pp. 125–161). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381373-2.00008-9>

Gerba, C. P. (2019). Environmental Toxicology. En *Environmental and Pollution Science* (pp. 511–540). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814719-1.00028-8>

Ghosal, D., Ghosh, S., Dutta, T. K., y Ahn, Y. (2016). Current State of Knowledge in Microbial Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): A Review. *Frontiers in Microbiology*. 7: 1–27. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01369>

Goldstein, B. D., Osofsky, H. J., y Lichtveld, M. Y. (2011). The Gulf Oil Spill. *The New England Journal of Medicine*. 364(14): 1334–1348. <https://doi.org/10.1056/NEJMra1007197>

Guo, H., Huang, K., Zhang, X., Zhang, W., Guan, L., Kuang, D., Deng, Q., Deng, H., Zhang, X., He, M., Christiani, D., y Wu, T. (2014). Women are more susceptible than men to oxidative stress and chromosome damage caused by polycyclic aromatic hydrocarbons exposure. *Environmental and Molecular Mutagenesis*. 55(6): 472–481. <https://doi.org/10.1002/em.21866>

Guo, Y., Huo, X., Wu, K., Liu, J., Zhang, Y., y Xu, X. (2012). Carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in umbilical cord blood of human neonates from Guiyu,

China. *Science of The Total Environment*. 427–428: 35–40.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.04.007>

Haç-Wydro, K., Poleć, K., y Broniatowski, M. (2019). The impact of selected Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) on the morphology, stability and relaxation of ternary lipid monolayers imitating soil bacteria membrane. *Journal of Molecular Liquids*. 276: 409–416. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.12.020>

Hao, J., y Yan, B. (2017). Determination of Urinary 1-Hydroxypyrene for Biomonitoring of Human Exposure to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Carcinogens by a Lanthanide-functionalized Metal-Organic Framework Sensor. *Advanced Functional Materials*. 27(6): 1–8. <https://doi.org/10.1002/adfm.201603856>

Hesham, A. E.-L., Khan, S., Tao, Y., Li, D., Zhang, Y., y Yang, M. (2012). Biodegradation of high molecular weight PAHs using isolated yeast mixtures: application of meta-genomic methods for community structure analyses. *Environmental Science and Pollution Research*. 19(8): 3568–3578. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-0919-8>

Huang, M., y Penning, T. M. (2014). Processing Contaminants: Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs). En *Encyclopedia of Food Safety* (Vol. 2, pp. 416–423). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-378612-8.00212-2>

Hussain, K., Balachandran, S., y Rafiqul Hoque, R. (2015). Sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of the Bharalu River, a tributary of the River Brahmaputra in Guwahati, India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 122: 61–67. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.07.008>

Ifegwu, O. C., y Anyakora, C. (2015). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. En *Advances in Clinical Chemistry* (1st ed., Vol. 72, pp. 277–304). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.acc.2015.08.001>

Izzotti, A., y Pulliero, A. (2014). The effects of environmental chemical carcinogens on the microRNA machinery. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*. 217(6): 601–627. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2014.01.001>

Jang, E., Alam, M. S., y Harrison, R. M. (2013). Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban air using positive matrix factorization and spatial distribution analysis. *Atmospheric Environment*. 79: 271–285. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.06.056>

Jesus, F., Pereira, J. L., Campos, I., Santos, M., Ré, A., Keizer, J., Nogueira, A., Gonçalves, F. J. M., Abrantes, N., y Serpa, D. (2022). A review on polycyclic aromatic hydrocarbons distribution in freshwater ecosystems and their toxicity to benthic fauna. *Science of The Total Environment*. 820: 153282. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153282>

Kakavandi, B., Rafiemanesh, H., Giannakis, S., Beheshtaeen, F., Samoili, S., Hashemi, M., y Abdi, F. (2023). Establishing the relationship between Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) exposure and male infertility: A systematic review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 250: 114485. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114485>

Kim, K. H., Jahan, S. A., Kabir, E., y Brown, R. J. C. (2013). A review of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their human health effects. *Environment International*. 60: 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.07.019>

Kuppusamy, S., Maddela, N. R., Megharaj, M., y Venkateswarlu, K. (2020). Impact of Total Petroleum Hydrocarbons on Human Health. En *Total Petroleum Hydrocarbons* (pp. 139–165). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24035-6_6

Kuppusamy, S., Thavamani, P., Megharaj, M., y Naidu, R. (2016). Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) by novel bacterial consortia tolerant to

diverse physical settings – Assessments in liquid- and slurry-phase systems. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 108: 149–157. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.12.013>

Kuppusamy, S., Thavamani, P., Venkateswarlu, K., Lee, Y. B., Naidu, R., y Megharaj, M. (2017). Remediation approaches for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contaminated soils: Technological constraints, emerging trends and future directions. *Chemosphere*. 168: 944–968. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.115>

Kurwadkar, S., Sethi, S. S., Mishra, P., y Ambade, B. (2022). Unregulated discharge of wastewater in the Mahanadi River Basin: Risk evaluation due to occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbon in surface water and sediments. *Marine Pollution Bulletin*. 179: 113686. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113686>

Låg, M., Øvrevik, J., Refsnes, M., y Holme, J. A. (2020). Potential role of polycyclic aromatic hydrocarbons in air pollution-induced non-malignant respiratory diseases. *Respiratory Research*. 21(1): 299. <https://doi.org/10.1186/s12931-020-01563-1>

Lawal, A. T. (2017). Polycyclic aromatic hydrocarbons. A review. *Cogent Environmental Science*. 3(1): 1339841. <https://doi.org/10.1080/23311843.2017.1339841>

López-Berenguer, G., Acosta-Dacal, A., Luzardo, O. P., Peñalver, J., y Martínez-López, E. (2023). Assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in mediterranean top marine predators stranded in SE Spain. *Chemosphere*. 336: 139306. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139306>

Madrid, F., Florido, M. C., Rubio-Bellido, M., Villaverde, J., y Morillo, E. (2022). Dissipation of a mix of priority PAHs in soils by using availability enhancers. Effect of aging and pollutant interactions. *Science of The Total Environment*. 837: 155744. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155744>

Maria Florencia, T., Iván, T. B., y Hebe Alejandra, C. (2022). Health risk assessment of exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons in household indoor environments. *Environmental Advances*. 7: 100159. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100159>

Mazarji, M., Minkina, T., Sushkova, S., Mandzhieva, S., Bidhendi, G. N., Barakhov, A., y Bhatnagar, A. (2021). Effect of nanomaterials on remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons-contaminated soils: A review. *Journal of Environmental Management*. 284: 112023. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112023>

McElhatton, P. R. (1999). Principles of teratogenicity. *Current Obstetrics & Gynaecology*. 9(3): 163–169. [https://doi.org/10.1016/S0957-5847\(99\)90060-4](https://doi.org/10.1016/S0957-5847(99)90060-4)

Menichini, E., y Bocca, B. (2003). POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS. En *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition* (pp. 4616–4625). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227055-X/00939-1>

Moubarz, G., Saad-Hussein, A., Shahy, E. M., Mahdy-Abdallah, H., Mohammed, A. M. F., Saleh, I. A., Abo-Zeid, M. A. M., y Abo-Elfadl, M. T. (2023). Lung cancer risk in workers occupationally exposed to polycyclic aromatic hydrocarbons with emphasis on the role of DNA repair gene. *International Archives of Occupational and Environmental Health*. 96(2): 313–329. <https://doi.org/10.1007/s00420-022-01926-9>

Munyengabe, A., Ndibewu, P. P., Sibali, L. L., y Ngobeni, P. (2022). Polymeric nanocomposite materials for photocatalytic detoxification of polycyclic aromatic hydrocarbons in aquatic environments-A review. *Results in Engineering*. 15: 100530. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100530>

Ogbunuzor, C., Fransen, L. F. H., Talibi, M., Khan, Z., Dalzell, A., Laycock, A., Southern, D., Eveleigh, A., Ladommatos, N., Hellier, P., y Leonard, M. O. (2023). Biodiesel exhaust particle airway toxicity and the role of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 259: 115013. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115013>

Okoro, H. K., Asaju, R. O., Ogunkunle, C. O., y Basheeru, K. A. (2020). Sources, Fate and Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Environment. *Nigerian Journal of Pharmaceutical and Applied Science Research*. 9(2): 67–75. [En línea]. Disponible en: <https://nijophasr.net/index.php/nijophasr/article/view/334>

Patel, A. B., Shaikh, S., Jain, K. R., Desai, C., y Madamwar, D. (2020). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: Sources, Toxicity, and Remediation Approaches. *Frontiers in Microbiology*. 11: 1–23. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.562813>

Phillips, D. H., y Arlt, V. M. (2009). Genotoxicity: damage to DNA and its consequences. En *Exs* (Vol. 99, pp. 87–110). https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8336-7_4

Picariello, E., Baldantoni, D., y De Nicola, F. (2020). Acute effects of PAH contamination on microbial community of different forest soils. *Environmental Pollution*. 262: 114378. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114378>

Qi, A., Wang, P., Lv, J., Zhao, T., Huang, Q., Wang, Y., Zhang, X., Wang, M., Xiao, Y., Yang, L., Ji, Y., y Wang, W. (2023). Distributions of PAHs, NPAHs, OPAHs, BrPAHs, and CIPAHs in air, bulk deposition, soil, and water in the Shandong Peninsula, China: Urban-rural gradient, interface exchange, and long-range transport. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 265: 115494. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115494>

Quijano Parra, A., Quijano Vargas, M. J., y Meléndez Gélvez, I. (2017). Genotoxicidad de los hidrocarburos aromáticos policíclicos extraídos mediante el sistema diclorometano-etanol-tolueno en muestras del aire de Cúcuta, Norte de Santander, Colombia. *Acta Toxicológica Argentina*. 25(1): 01–11. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-37432017000100001

Ranjbar Jafarabadi, A., Mashjoor, S., Riyahi Bakhtiari, A., y Jadot, C. (2020). Dietary intake of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from coral reef fish in the Persian Gulf — Human health risk assessment. *Food Chemistry*. 329: 127035. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127035>

Ravindra, K., Sokhi, R., y Vangrieken, R. (2008). Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: Source attribution, emission factors and regulation. *Atmospheric Environment*. 42(13): 2895–2921. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.12.010>

Rengarajan, T., Rajendran, P., Nandakumar, N., Lokeshkumar, B., Rajendran, P., y Nishigaki, I. (2015). Exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons with special focus on cancer. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*. 5(3): 182–189. [https://doi.org/10.1016/S2221-1691\(15\)30003-4](https://doi.org/10.1016/S2221-1691(15)30003-4)

Sakshi, Singh, S. K., y Haritash, A. K. (2019). Polycyclic aromatic hydrocarbons: soil pollution and remediation. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 16(10): 6489–6512. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02414-3>

Shala, N. K., Stenehjem, J. S., Babigumira, R., Liu, F.-C., Berge, L. A. M., Silverman, D. T., Friesen, M. C., Rothman, N., Lan, Q., Hosgood, H. D., Samuelsen, S. O., Bråtveit, M., Kirkeleit, J., Andreassen, B. K., Veierød, M. B., y Grimsrud, T. K. (2023). Exposure to benzene and other hydrocarbons and risk of bladder cancer among male offshore petroleum workers. *British Journal of Cancer*. 129(5): 838–851. <https://doi.org/10.1038/s41416-023-02357-0>

Smol, M., y Włodarczyk-Makula, M. (2017). The Effectiveness in the Removal of PAHs from Aqueous Solutions in Physical and Chemical Processes: A Review. *Polycyclic Aromatic Compounds*. 37(4): 292–313. <https://doi.org/10.1080/10406638.2015.1105828>

Song, X., Li, C., y Chen, W. (2022). Phytoremediation potential of Bermuda grass (*Cynodon dactylon* (L.) pers.) in soils co-contaminated with polycyclic aromatic

hydrocarbons and cadmium. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 234: 113389.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113389>

Sosa, G. L., y Zalts, A. (2012). Adsorción de colorantes sobre tierra de diatomeas. Un trabajo de laboratorio con enfoque ambiental. *Educación Química*. 23(4): 492–497. [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(17\)30138-6](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(17)30138-6)

Sousa, G., Teixeira, J., Delerue-Matos, C., Sarmiento, B., Morais, S., Wang, X., Rodrigues, F., y Oliveira, M. (2022). Exposure to PAHs during Firefighting Activities: A Review on Skin Levels, In Vitro/In Vivo Bioavailability, and Health Risks. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 19(19): 12677. <https://doi.org/10.3390/ijerph191912677>

Srogi, K. (2007). Monitoring of environmental exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 5(4): 169–195. <https://doi.org/10.1007/s10311-007-0095-0>

Stamatelatou, K., Pakou, C., y Lyberatos, G. (2011). Occurrence, Toxicity, and Biodegradation of Selected Emerging Priority Pollutants in Municipal Sewage Sludge. En *Comprehensive Biotechnology* (Second Edi, Vol. 6, pp. 473–484). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-088504-9.00496-7>

Sun, K., Song, Y., He, F., Jing, M., Tang, J., y Liu, R. (2021). A review of human and animals exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: Health risk and adverse effects, photo-induced toxicity and regulating effect of microplastics. *Science of The Total Environment*. 773: 145403. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145403>

Sundar, R., Jain, M. R., y Valani, D. (2018). Mutagenicity Testing. En *Mutagenicity: Assays and Applications* (pp. 191–228). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809252-1.00010-9>

Unwin, J., Cocker, J., Scobbie, E., y Chambers, H. (2006). An Assessment of Occupational Exposure to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the UK. *The Annals of Occupational Hygiene*. 50(4): 395–403. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mel010>

Wang, Z., Ren, P., Sun, Y., Ma, X., Liu, X., Na, G., y Yao, Z. (2013). Gas/particle partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons in coastal atmosphere of the north Yellow Sea, China. *Environmental Science and Pollution Research*. 20(8): 5753–5763. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1588-y>

Wenning, R. J., y Martello, L. (2014). POPs in Marine and Freshwater Environments. En *Environmental Forensics for Persistent Organic Pollutants* (pp. 357–390). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59424-2.00008-6>

Zhang, L., Yang, L., Zhou, Q., Zhang, X., Xing, W., Wei, Y., Hu, M., Zhao, L., Toriba, A., Hayakawa, K., y Tang, N. (2020). Size distribution of particulate polycyclic aromatic hydrocarbons in fresh combustion smoke and ambient air: A review. *Journal of Environmental Sciences*. 88: 370–384. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.09.007>

Zhang, Y., Zhang, L., Huang, Z., Li, Y., Li, J., Wu, N., He, J., Zhang, Z., Liu, Y., y Niu, Z. (2019). Pollution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in drinking water of China: Composition, distribution and influencing factors. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 177: 108–116. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.03.119>

Revisión del aislamiento del cannabidiol mediante técnicas de encapsulación

Review of isolation of cannabidiol using encapsulation techniques

Erik De La Rosa-Montelongo¹, Lucero Rosales-Marines^{1*}, Lorena Farías-Cepeda¹ Juan Luis de la Peña-Zúñiga¹, Victor Manuel Ovando-Medina²

¹ Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Blvd. V. Carranza s/n, Col. República Oriente, C.P. 25280, Saltillo, Coahuila, México.

² Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Unidad Académica Multidisciplinaria Académica Región Altiplano, Departamento de Ingeniería Química.

Autor de correspondencia: Lucero Rosales Marines Universidad Autónoma de Coahuila
Correo electrónico: lucero_rosales@uadec.edu.mx

Resumen

Recientemente, el cannabidiol (CBD), ha ganado atención en aplicaciones médicas debido a su capacidad para aliviar el dolor, reducir la inflamación, calmar la ansiedad y actuar como antipsicótico y anticonvulsante, sin causar los efectos psicoactivos asociados al tetrahidrocannabidiol (THC). Sin embargo, su encapsulación o incorporación en matrices es fundamental para su administración oral, ya que el CBD es altamente lipofílico y sensible a la luz, lo que disminuye su biodisponibilidad. Varios métodos de encapsulación, como la coacervación, emulsificación, uso de liposomas y gelación molecular son empleados para proteger el CBD y controlar su liberación. Diversos estudios han explorado la encapsulación del CBD utilizando diferentes matrices, tales como polímeros, glúcidos y formulaciones a base de lípidos. Por ejemplo, se han utilizado polímeros como el copolímero de poli(ácido láctico-co-glicólico) y la zeína, logrando eficiencias de encapsulación del 86% y 69%, respectivamente. Los alginatos han mostrado eficiencias de encapsulación del CBD entre el 23% y 87%, mejorando aún más al combinarlos con ácido desoxicólico o quitosano. La γ -ciclodextrina (γ -CD) ha demostrado su capacidad para encapsular el CBD cuando se combina con estructuras organometálicas. Además, formulaciones a base de lípidos, como nanoemulsiones con lecitina y aceite de girasol, han logrado eficiencias de encapsulación del 90% en estudios específicos. La revisión bibliográfica presentada en este trabajo analiza diez estudios recientes que utilizan diversas matrices para encapsular el CBD. Estos estudios resaltan las diferentes eficiencias de encapsulación, destacando el potencial de estas técnicas para mejorar la estabilidad y administración del CBD en tratamientos médicos.

Palabras clave: cannabidiol, encapsulación, eficiencia, nanocargadores

Abstract

Cannabidiol (CBD), has garnered attention in the production of medical products due to its pain-relieving, anti-inflammatory, anxiolytic, antipsychotic, and anticonvulsant properties, without inducing the psychoactive effects associated with tetrahydrocannabidiol (THC). Encapsulation is crucial for its oral administration as CBD is highly lipophilic and light-sensitive, leading to decreased bioavailability. Various encapsulation methods such as coacervation, emulsification, use of liposomes, and molecular gelling are employed to shield CBD and regulate its release. Several studies have explored CBD encapsulation using different matrices, including polymers, carbohydrates, and lipid-based formulations. For instance, polymers like poly(lactic-co-glycolic acid) and zein have achieved encapsulation

efficiencies of 86% and 69%, respectively. Alginates have shown CBD encapsulation efficiencies ranging from 23% to 87%, further improving when combined with deoxycholic acid or chitosan. γ -cyclodextrin has demonstrated its ability to encapsulate CBD when combined with metal-organic frameworks. Furthermore, lipid-based formulations, such as nanoemulsions with lecithin and sunflower oil, have attained encapsulation efficiencies of 90% in specific studies. The literature review assesses ten recent studies employing different matrices to encapsulate CBD. These studies underscore varied encapsulation efficiencies, highlighting the potential of these techniques to enhance CBD stability and administration in medical treatments.

Keywords: cannabidiol, encapsulation, efficiency, nanocarriers

Introducción

El cannabidiol (CBD) es uno de los cannabinoides más abundantes derivados de la *Cannabis sativa*, este componente puede ser utilizado para la elaboración de productos de uso médico, debido a sus efectos analgésicos, antiinflamatorios, ansiolíticos, antipsicóticos, anticonvulsionantes, además de que el CBD tiene la ventaja de no mostrar los efectos psicotrópicos presentes en el tetrahidrocannabidiol (THC). Debido a esta notable diferencia, el CBD presenta un amplio potencial para su uso en tratamientos terapéuticos, tanto para enfermedades que afectan el sistema nervioso central como tratamientos contra el cáncer, mitigación de dolor, entre otros (Martinez y col., 2022; Scuderi y col., 2009; Seltzer y col., 2020). En los últimos años se han desarrollado diversos productos a base de cannabinoides empleando diferentes vías de administración, entre ellas la más común es la oral. Sin embargo, para poder ser utilizado de esta manera se requiere encapsular el CBD en emulsiones, liposomas o partículas poliméricas, esto debido a que el CBD es altamente lipofílico y tiende a degradarse dependiendo de la temperatura y exposición a la luz por lo que presenta baja biodisponibilidad y perfiles farmacocinéticos variables (Millar y col., 2020). Una forma de poder evitar que esto suceda es manteniendo su actividad por aislamiento total o parcial hasta su debida liberación (Peng y col., 2022).

Las técnicas de encapsulación son muy útiles porque permiten preservar compuestos bioactivos provenientes de fuentes naturales tales como aceites esenciales, antioxidantes, flavonoides, probióticos, vitaminas, entre otros, de tal forma que permite mantener su actividad debido al aislamiento generado por la matriz encapsulante (Díaz-Montes y col., 2023). Otras ventajas que aporta la

encapsulación de compuestos bioactivos es la posibilidad de una administración eficaz de fármacos altamente lipofílicos, protección frente a entornos agresivos, una administración dirigida y controlada para lograr una liberación en un tejido específico durante un período de tiempo determinado (Vargas, 2020). Para lograr la protección de los factores ambientales existen diferentes técnicas de encapsulación, coacervación, emulsificación, formación de liposomas, gelación molecular, etcétera (López C. y col., 2011).

Estas técnicas representan una gran herramienta para encontrar un promotor receptor en el cual aislar el CBD, y así mejorar la baja biodisponibilidad que presenta, logrando una mejor liberación controlada. Además, otorgando diferentes propiedades tales como una mayor estabilidad, bioadhesividad, hidrofiliidad, alta capacidad para asociarse y liberar moléculas terapéuticas (Grifoni y col., 2022).

En los últimos años y con la legalización del Cannabis en diversos países, las investigaciones en torno a la planta, sus componentes, y sus aplicaciones como posibles tratamientos médicos han ido en aumento. No obstante, como se mencionó previamente, uno de sus componentes más prometedores, el CBD, resulta muy inestable para trabajarlo al ser extraído de su matriz biológica, debido a esto es que se han empleado diferentes métodos para encapsularlo, así como diferentes matrices para recubrirlo.

A continuación, se hace una revisión de algunas técnicas y compuestos utilizados para encapsular la molécula del CBD en los últimos años.

Polímeros

Uno de los primeros estudios a mencionar en cuanto al uso de nanopartículas es el realizado por Fraguas-Sánchez y col., en el que utilizaron el poli(ácido láctico-co-glicólico) (PLGA) como polímero para formar nanopartículas de CBD utilizando la técnica de emulsión- evaporación de solvente, disolviendo la mezcla de PLGA/CBD en diclorometano para así emulsionarlos en alcohol polivinílico, obteniendo partículas con forma esférica, con un tamaño promedio de 240 nm, una eficiencia de encapsulación promedio del 86%, y un porcentaje de liberación promedio de CBD a los 90 min de 55.5% (Fraguas-Sánchez y col., 2020).

Por otro lado, Wang y col., formularon nanopartículas de CBD utilizando como base zeína en polvo la cuál fue disuelta en etanol al 90%, a dicha solución se le agregó polvo de CBD, para después ser inyectada gota a gota en una solución de proteína de suero. Una vez formada la suspensión de nanopartículas se sometió a

evaporación eliminando el etanol y agregando agua en proporción del etanol perdido. Las nanopartículas formadas por zeína/proteína de suero/CBD mostraron un tamaño de partícula de 152 nm después de ser recubiertas por la proteína de suero, su índice de polidispersidad se mantuvo debajo de 0.2, lo cual indica una distribución de tamaño de partícula relativamente estrecha, en cuanto a la eficiencia de encapsulación de las capsulas de zeína/CBD se observó una eficiencia de 69%, pero al adicionar gota a gota la solución acuosa de zeína-etanol a una solución agitada de proteína de suero-agua la eficiencia de encapsulación tiene una mejora significativa en eficiencia de encapsulación ($p < 0,05$), asimismo, presentaron una buena redispersibilidad, buena fotoestabilidad, estabilidad térmica y de almacenamiento, demostrando ser un buen sistema coloidal (Wang y col., 2022).

Porras en su tesis utiliza un copolímero conformado por los polímeros metoxipolietilenglicol (PEG) y ϵ -caprolactona (PCL) para aislar el CBD. La síntesis de este copolímero se llevó a cabo adicionando 2kDa peso molecular de PEG a una solución de tolueno y $\text{Sn}(\text{Oct})_2$ con relación 100:1, agitándose durante 15 min en una atmosfera inerte, para inmediatamente después se adicionar 4kDa peso molecular de PCL, dejando la reacción durante 24 h a 110 °C, el producto final obtenido de la reacción se purifica precipitando el polímero con éter etílico frío y se deja enfriar durante 12 horas más para precipitar la máxima cantidad del polímero. Este copolímero se modifica con ácidos grasos mediante la reacción de Steglich con 3-azidopropilamina para potenciar su uso para la encapsulación de diferentes fármacos lipofílicos consiguiendo valores de eficiencia de encapsulación (EE) de por encima del 90% y una carga de liberación entre 26.26 y 46.70 %, dependiendo de la cantidad del polímero a la hora de encapsular (Porras Argüello, 2022).

Además, se ha llevado a cabo el desarrollo de nanocompositos de criogeles para la administración tópica. Para esto, primero se prepararon micelas poliméricas tipo núcleo-coraza (core-shell) y se cargaron con CBD, seleccionando Pluronic™ F-127 como surfactante para formar micelas de copolímero en bloque, con concentraciones finales de polímero y CBD de 30 y 10 g/L, respectivamente. Luego de eso, la solución micelar se mezcló con una solución acuosa de hidroxietilcelulosa y se entrecruzó utilizando diferentes agentes y H_2O_2 como fotoiniciador. La mezcla se sometió a un enfriamiento de -20 °C durante 2 h para después ser irradiada con luz ultravioleta durante 2 min. El criogel se obtuvo después de la homogeneización de la mezcla. La caracterización de la micelas se realizó mediante mediciones DLS, evidenciando la formación de una población de pequeñas micelas con un diámetro hidrodinámico de 21 nm, mientras que la carga de CBD dentro de las micelas fue de 25% (Momekova y col., 2020).

Polisacáridos

Los polisacáridos también han sido empleados como material encapsulante para el CBD, siendo los alginatos una opción factible gracias a su buena biocompatibilidad, brindar un efecto hidrofílico al complejo formado y no ser nocivos para el cuerpo humano. Los alginatos han demostrado ser un buen bio-material teniendo una buena aplicación en la medicina, gracias a su capacidad de formar gel y retener el contenido de humedad, siendo utilizado como vendajes para heridas, administración de fármacos e ingeniería tisular (Ahmad Raus y col., 2021).

Por su parte, Monou y col., fabricaron películas de alginato cargadas con CBD o CBG (cannabigerol) para su aplicación en la curación de heridas, para esto solubilizaron CBD, CBG y Pluronic™ F-127 en misma proporción de peso en etanol al 99%, dejando la mezcla en agitación a oscuras durante 24 horas para la evaporación del etanol. Una vez pasadas las 24 horas, se obtiene un líquido viscoso al cual se le adicionó agua destilada para después llevarse a sonicar por dos minutos, observándose una suspensión opaca de nanopartículas. Las suspensión de cannabinoides obtenidas se mezcló con dos soluciones diferentes para obtener las películas, siendo la primera solución de alginato de sodio al 10% y la segunda de cloruro de calcio al 10%, mezclando 2 mL de la suspensión de cannabinoides, 3 mL de la solución de alginato y 0.4 mL de la solución de CaCl_2 , formando así una tinta la cual sería utilizada para formar las películas, las cuales obtuvieron un índice de polidispersidad (PDI) de 0.29 ± 0.6 y un tamaño de partícula de 197 ± 28.6 nm para CBD, mientras que para CBG el PDI obtenido fue de 0.22 ± 0.07 y su tamaño de partícula fue de 229 ± 58 nm, igualmente se calcularon la carga del fármaco y la eficiencia de atrapamiento de las nanopartículas, obteniendo valores de $98.25 \pm 1.20\%$ y $99.35 \pm 2.35\%$ para CBD y $97.58 \pm 2.39\%$ y $98.39 \pm 1.87\%$ para CBG; demostrando así que las nanopartículas presentaban una estabilidad térmica mejorada, así como excelentes perfiles de liberación, carga de fármaco y eficiencia de atrapamiento (Monou y col., 2022).

También podemos mencionar los estudios realizados por Majimbi y col., en el 2021, ellos utilizaron un alginato de sodio (AS) de viscosidad media en fase acuosa mezclado con una fase oleosa de CBD hecha con Miglyol 812® (ácidos grasos derivados del aceite de coco y glicerina), para inmediatamente después de formulada la emulsión, formar las microcápsulas en un baño de endurecimiento de CaCl_2 , obteniendo cápsulas con un tamaño de 400 ± 50 μm , teniendo una apariencia esférica y blanquecina, y manteniendo su apariencia por 30 días; la eficiencia de encapsulación del CBD fue de $23 \pm 1.2\%$ y la carga estimada de CBD fue del

2.05±0.1%. Se realizaron experimentos *in vivo* en animales observando cómo se comporta la concentración de CBD en el cerebro en un tiempo de 200 min para medir su absorción, mostrando las cápsulas una baja respuesta. A pesar de la baja eficiencia de encapsulación y baja absorción de CBD de las cápsulas de AS/CBD, se observó que al complementar la cápsulas de AS/CBD con cápsulas de ácido desoxicólico (DCA), la tendencia de absorción del CBD dentro del cerebro logra mejorar 40 veces más, además de extender su retención (Majimbi y col., 2021).

Nuevamente utilizando el alginato, en otro estudio formaron un material encapsulante conformado por AS y quitosano, utilizando un método optimizado para la microencapsulación de polifenoles con algunas modificaciones, que consistió en mezclar un extracto de cannabis en etanol, en una solución etanólica de fosfatidilcolina, la cual fue adicionada a una solución de alginato de sodio de baja densidad, para después formar las microcápsulas, estas cápsulas brindaron un desempeño estándar para la encapsulación de cannabinoides, teniendo una eficiencia de encapsulación del 87% para el CBD. Sin embargo, ofrecen un método que no representa grandes costos, o generar residuos nocivos (Villate y col., 2023).

Otro carbohidrato que se ha empleado es la γ -ciclodextrina (γ -CD) en combinación con estructuras órganometálicas. (MOFs) empleando el método de irradiación de microondas. Las estructuras órganometálicas fueron hechas con una mezcla de KOH y γ -CD en agua con una relación molar de 1:8, para después adicionar etanol con respecto al 60% del volumen de la solución de γ -CD/MOFs en agua. A esta solución inicial se le sometió a una irradiación de microondas por 10 min a 50°C. Una vez concluido ese proceso al resultado se le adicionó polietilenglicol 200 durante una hora, para desencadenar la precipitación de cristales, posteriormente se retiró el material no reaccionado y se hicieron lavados para después secar el material al vacío durante una noche. De este proceso se obtiene un sistema alcalino con un pH de 12, para evitar que los cannabinoides se oxiden al estar en presencia de un ambiente alcalino, se procedió a neutralizar el sistema con los cristales con una mezcla de ácido acético y metanol, para así adicionar Olivetol (Rodríguez-Martínez et al., 2023). A pesar de que el Olivetol es un precursor cannabinoide, la γ -CD ha demostrado mediante estudios de dinámica molecular ser un material capaz de encapsular la molécula de CBD, presentando una buena respuesta tanto en medios acuosos como salinos (da Silva & dos Santos, 2020).

Formulaciones a base de lípidos

Dentro de las formulaciones utilizando bases lipídicas entran las nanoemulsiones, microemulsiones, sistemas de administración de fármacos autoemulsionantes.

Cabe mencionar que se han realizado varios estudios utilizando como matriz diferentes núcleos lipídicos para el cannabinoide, encontrando así que la carga absoluta del fármaco dependerá del lípido que se utilice, mientras que la estabilidad de la emulsión se encuentra limitada por sus condiciones de estrés mecánico (agitación, temperatura, presión, etc.) (Francke y col., 2021).

Uno de los estudios a tomar en cuenta es el realizado por Volmajer y col. que lograron encapsular el CBD con una eficiencia del 90% en liposomas formados utilizando lecitina y aceite de girasol, obteniendo un tamaño de partícula de 1910 nm, un índice de polidispersidad de 0.8, un potencial zeta de -5 mV, toda esta investigación con el fin de usarlo para el revestimiento de celulosa, en un uso potencial para material sanitario (Volmajer Valh y col., 2020).

Aguzzi y col., prepararon nanoemulsiones usando aceites esenciales de cáñamo mediante un método de homogeneización a alta presión. Donde consiguieron un sistema emulsionado añadiendo la cantidad necesaria de aceites esenciales de cáñamo, solubilizados previamente en oleato de etilo, en una solución acuosa de polisorbato 80 con una agitación a alta velocidad durante 5 min a 9500 rpm. Y homogenizando las emulsiones a una presión de 130 MPa, mostrando un diámetro promedio de 200 nm con un PDI de 0.3, las nanoemulsiones formuladas mostraron estabilidad durante 4 meses, su estudio respalda el posible uso seguro del aceites esenciales de cáñamo para un uso terapéutico (Aguzzi y col., 2023).

Otra nanoemulsión que se ha estudiado para este fin, consiste en 75% agua, 5% tween 20 y 20% de ácido oleico, el tween 20 es un tensoactivo muy usado en la industria farmacéutica. La nanoemulsión presentó un comportamiento newtoniano y baja viscosidad; el tamaño de gota estaba entre 10-100 nm, esta nanoemulsión fue empleada para elaborar una goma masticable para dispersar gotas de CBD con objetivos medicinales (Farkas Herrera y col., 2018).

Se han investigado cargadores lipídicos nanoestructurados (NCL) para encapsular el CBD, como el estudio hecho por Morakul y col., donde, utilizaron el palmitato de cetilo como una matriz lipídica sólida adicionándole dietilenglicol éter monoetílico y ácido oleico para preparar la nanoestructuras. Todas las nanopartículas se produjeron por la técnica homogeneización a alta presión (HPH). En la fase lipídica que consistía en un lípido sólido, aceite y extracto de CBD se funde a una temperatura de 75 – 80 °C. Mientras que la fase acuosa que contenía los tensoactivos Tego® Care 450 y Poloxamer 188 se calentó a 80 – 85 °C, añadiendo la fase acuosa caliente a la fase lipídica derretida en agitación a 8000 rpm durante un min. Posteriormente la emulsión se colocó en el homogeneizador durante tres

ciclos a 500 bar, para después dejar enfriar la emulsión a temperatura ambiente, formando nanopartículas lipídicas. Las nanopartículas obtenidas por este procedimiento obtuvieron un rango tamaño de partícula de 163 – 176 nm con un valor promedio de PDI menor a 0.1, lo cual indica distribuciones de tamaño estrechas y obteniendo una EE casi del 100% (Morakul y col., 2023).

De igual manera se han formado complejos utilizando lípidos y proteínas para formar lipoproteínas, estas lipoproteínas pueden ser de baja o alta densidad. Un estudio donde utilizaron lipoproteínas de baja densidad en combinación con carboximetilcelulosa (LDL-CMC), como una potencial matriz para el CBD, es el realizado por Tao Fei y col., donde para encapsular una mezcla de terpenos-cannabidiol (TP-CBD) emulsionada en el complejo LDL-CMC usaron como material dispersante el lauril sulfato de sodio y tween 80, observando los diferentes factores que afectan la dispersabilidad del complejo LDL-CMC, ellos demostraron una nanoencapsulación de CBD que resulta ser estable al congelamiento, descongelamiento y calentamiento empleando la dispersión de LDL-CMC, de igual manera la dispersión presentó una estabilidad de almacenamiento de hasta dos semanas bajo condiciones ambientales normales en todos los experimentos realizados (Fei y col., 2021).

En otro estudio donde los liposomas volvieron a ser la matriz encapsulante, se formó un complejo solubilizando fosfatidilcolina de soya (SSC), protopanaxadiol (PPD) y CBD en etanol, una vez solubilizado en el solvente orgánico fue removido por evaporación rotatoria a 40°C, hasta formar una película uniforme al fondo del recipiente, después de eso se le adicionó agua desionizada agitándose en un baño sónico por 20 min a 60°C, formando así el complejo de CBD/PPD/liposomas, presentando una morfología esférica con una bicapa liposomal, un tamaño de partícula de 138.8 nm, índice de polidispersidad de 0.245, una carga de fármaco de 14.26% y un eficiencia de encapsulación casi del 100% (Fu y col., 2022).

Igual habría que mencionar el uso de las nanovesículas para encapsular al CBD, en un estudio llevado por Di Bello y col., donde mezclaron CBD con cardanol (CA) y colesterol (CH) (con relación molar 0.5:1:0.6), mediante agitación a 200 rpm durante una hora y a una temperatura de 90 °C, dando como resultado una película lipídica. La película resultante se hidrató con una solución buffer de borato a pH 9.0, se precalentó a 50 °C en agitación a 800 rpm y finalmente se calentó a 90 °C durante 1 h. Las vesículas obtenidas se sometieron a una etapa de sonicación durante 15 min a 60 °C, y luego se centrifugó a 7000 rpm durante 15 min. Se eliminó la suspensión del precipitado y se recogió como muestra (CA-CH-CBD). Después de eso, se purificó la muestra adoptando un modelo de diálisis eliminando el CBD no

atrapado en nanovesículas. Las nanovesículas formadas presentaron un tamaño de partícula promedio de 276.9 nm y un índice bajo de polidispersidad de 0.12. Una estabilidad considerable del nanosistema con un valor ZP de -80.9 mV y una EE de 73.93%. Estas vesículas mostraron mantenerse estables durante un tiempo de 30 días a 20 °C y 21 días en refrigeración (Di Bello y col., 2017).

Gracias a la actual popularidad en torno a los cannabinoides sobre todo del cannabidiol, las investigaciones en torno a su uso como tratamiento para distintas enfermedades ha ido creciendo poco a poco. Debido a esto es que ha surgido la necesidad de encontrar diversas matrices que aporten las propiedades necesarias para aumentar la biodisponibilidad y que pueda ser utilizado como fármaco en tratamientos médicos, por lo que se optó por realizar una revisión de algunas de las diferentes matrices que se han utilizado para la encapsulación del CBD, denotando tanto el proceso que se llevó para realizar la encapsulación como le eficiencia que se obtuvo al utilizar dicha matriz. En la Tabla 1, se muestra un breve resumen de los nanocargadores mencionados en esta revisión, así como su eficiencia de encapsulación.

Tabla 1. *Nanocargadores desarrollados cargados con CBD y sus composiciones, eficiencia de encapsulación de CBD, contenido de CBD.*

Tipo de nano cargador	Composición	Eficiencia de encapsulación	Referencia
Nanopartículas	PGLA	86%	(Fraguas-Sánchez y col., 2020)
Nanopartículas	Zeína + Proteína de suero	76%	(Wang y col., 2022)
Nanopartículas	AS	23%	(Majimbi y col., 2021)
Nanopartículas	AS + Quitosano	87%	(Villate y col., 2023)
Nanopartículas	PEG-PCL	90%	(Porras Argüello, 2022)
Nanopartículas	NCL	Casi 100%	(Morakul y col., 2023)
Micelas	PF-127	Sin información disponible	(Momekova y col., 2020)
Hidrogeles	PF-127 + AS	Sin información disponible	(Monou y col., 2022)

Nanovesículas	CA + CH	73.93%	(Di Bello y col., 2017)
Microemulsión	LDC + CMC	Sin información disponible	(Fei y col., 2021)
Nanoemulsión	Oleato de etilo	Sin información disponible	(Aguzzi y col., 2023)
Nanoemulsión	SSC + PPD	Casi 100%	(Fu y col., 2022)
Nanoemulsión	Lecitina + Aceite de girasol	90%	(Volmajer Valh y col., 2020)

Fuente: Elaboración propia

Conclusión

Entre los estudios revisados, se tuvieron sistemas en forma de nanopartículas poliméricas, emulsiones (nanoemulsiones y microemulsiones), micelas, hidrogeles, pero de igual manera existen registros del uso de nanosuspensiones, vesículas, nanovectores, híbridos de nanopartículas inorgánicas/poliméricas. Si bien aún se siguen estudiando diversas matrices en las cuales aislar los cannabinoides, se puede observar como el CBD tiende a tener mayor eficiencia de encapsulación en ambientes lipídicos. No obstante, también hay que mencionar que existen matrices poliméricas que igual muestran una buena eficiencia de encapsulación, dentro de los que pueden llegar a destacar los polisacáridos al ser materiales de relativamente bajo costo para ser empleados. Algo a tomar en cuenta en los diferentes sistemas de encapsulación reportados son los aditivos empleados para dicho fin, por ejemplo, tensoactivos, disolventes, polímeros, etc., los cuales podrían ser tóxicos o no biocompatibles, es decir, una alta eficiencia de encapsulación/liberación no implica que sean de aplicación biomédica.

Agradecimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca con No. CVU 1241662 para la realización de este posgrado. Igualmente se agradece a la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Coahuila, por proporcionar las instalaciones y accesibilidad a la información para el desarrollo de este trabajo.

Referencias

- Aguzzi, C., Perinelli, D. R., Cespi, M., Zeppa, L., Mazzara, E., Maggi, F., Petrelli, R., Bonacucina, G., & Nabissi, M. (2023). Encapsulation of Hemp (*Cannabis sativa* L.) Essential Oils into Nanoemulsions for Potential Therapeutic Applications: Assessment of Cytotoxicological Profile. *Molecules*, 28: 6479. <https://doi.org/10.20944/preprints202307.1840.v1>
- Ahmad Raus, R., Wan Nawawi, W. M. F., & Nasaruddin, R. R. (2021). Alginate and alginate composites for biomedical applications. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 16(3): 280–306. <https://doi.org/10.1016/j.ajps.2020.10.001>
- da Silva, A. J., & dos Santos, E. S. (2020). Energetic and thermodynamical aspects of the cyclodextrins-cannabidiol complex in aqueous solution: a molecular-dynamics study. *European Biophysics Journal*, 49(7): 571–589. <https://doi.org/10.1007/s00249-020-01463-8>
- Di Bello, M. P., Bloise, E., Mazzetto, S. E., & Mele, G. (2017). Formulation and Chemical Stability in Aqueous Media of Cannabidiol Embedded in Cardanol-Based Nanovesicles. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(10): 8870–8875. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b01658>
- Díaz-Montes, E., Cerón-Montes, G. I., & Vargas-León, E. A. (2023). Encapsulación de compuestos bioactivos: una revisión sistemática. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías Del ICBI*, 10(20): 17–28. <https://doi.org/10.29057/icbi.v10i20.9575>
- Farkas Herrera, I., Ricardo, J., & Herrera, M. (2018). *Formulación y caracterización de goma masticable a partir de nanoemulsión diseñada para dispersar gotas de CBD (cannabidiol) con objetivos medicinales*. Universidad de los Andes, Colombia. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1992/40176>
- Fei, T., Wan, Z., & Wang, T. (2021). Dispersing insoluble yolk low-density lipoprotein (LDL) recovered by complexing with carboxymethylcellulose (CMC) for the nanoencapsulation of hemp cannabidiol (CBD) through emulsification at neutral pH. *Food Hydrocolloids*, 116(July 2020): 106656. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106656>
- Fraguas-Sánchez, A. I., Torres-Suárez, A. I., Cohen, M., Delie, F., Bastida-Ruiz, D., Yart, L., Martin-Sabroso, C., & Fernández-Carballido, A. (2020). PLGA Nanoparticles for the Intraperitoneal Administration of CBD in the Treatment of Ovarian Cancer: In Vitro and In Ovo Assessment. *Pharmaceutics*, 12(5): 439. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics12050439>
- Francke, N. M., Schneider, F., Baumann, K., & Bunjes, H. (2021). Formulation of Cannabidiol in Colloidal Lipid Carriers. *Molecules*, 26(5): 1469. <https://doi.org/10.3390/molecules26051469>
- Fu, J., Zhang, K., Lu, L., Li, M., Han, M., Guo, Y., & Wang, X. (2022). Improved Therapeutic Efficacy of CBD with Good Tolerance in the Treatment of Breast Cancer

- through Nanoencapsulation and in Combination with 20(S)-Protopanaxadiol (PPD). *Pharmaceutics*, 14(8): 1533. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14081533>
- Grifoni, L., Vanti, G., Donato, R., Sacco, C., & Bilia, A. R. (2022). Promising Nanocarriers to Enhance Solubility and Bioavailability of Cannabidiol for a Plethora of Therapeutic Opportunities. *Molecules*, 27(18). <https://doi.org/10.3390/molecules27186070>
- López C., A. F., Deladino, L., Navarro, A. S., & Martino, M. N. (2011, November 7). Encapsulación de compuestos bioactivos con alginatos para la industria de alimentos. *@limentech*, 10(5): 18–27. [En línea]. Disponible en: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/107212>
- Majimbi, M., Brook, E., Galettis, P., Eden, E., Al-Salami, H., Mooranian, A., Al-Sallami, H., Lam, V., Mamo, J. C. L., & Takechi, R. (2021). Sodium alginate microencapsulation improves the short-term oral bioavailability of cannabidiol when administered with deoxycholic acid. *PLOS ONE*, 16(6): e0243858. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0243858>
- Martinez, D., Alvarez, A., Cornick, T., Barboza, A., & Venegas, A. (2022). Efecto antiinflamatorio del cannabidiol en la recuperación de deportistas de alto rendimiento: revisión bibliográfica. *Revista Ciencia y Salud Integrando Conocimientos*, 6(1): 87–94. <https://doi.org/10.34192/cienciaysalud.v6i1.409>
- Millar, S. A., Maguire, R. F., Yates, A. S., & O'sullivan, S. E. (2020). Towards better delivery of cannabidiol (Cbd). *Pharmaceutics*, 13(9): 1–15. <https://doi.org/10.3390/ph13090219>
- Momekova, D., Ivanov, E., Konstantinov, S., Ublekov, F., & Petrov, P. D. (2020). Nanocomposite Cryogel Carriers from 2-Hydroxyethyl Cellulose Network and Cannabidiol-Loaded Polymeric Micelles for Sustained Topical Delivery. *Polymers*, 12(5): 1172. <https://doi.org/10.3390/polym12051172>
- Monou, P. K., Mamaligka, A. M., Tzimtzimis, E. K., Tzetzis, D., Vergkizi-Nikolakaki, S., Vizirianakis, I. S., Andriotis, E. G., Eleftheriadis, G. K., & Fatouros, D. G. (2022). Fabrication and Preliminary In Vitro Evaluation of 3D-Printed Alginate Films with Cannabidiol (CBD) and Cannabigerol (CBG) Nanoparticles for Potential Wound-Healing Applications. *Pharmaceutics*, 14(8): 1637. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14081637>
- Morakul, B., Junyaprasert, V. B., Sakchaisri, K., & Teeranachaideekul, V. (2023). Cannabidiol-Loaded Nanostructured Lipid Carriers (NLCs) for Dermal Delivery: Enhancement of Photostability, Cell Viability, and Anti-Inflammatory Activity. *Pharmaceutics*, 15(2): 537. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15020537>
- Peng, J., Fan, M., An, C., Ni, F., Huang, W., & Luo, J. (2022). A narrative review of molecular mechanism and therapeutic effect of cannabidiol (CBD). *Basic & Clinical Pharmacology & Toxicology*, 130(4): 439–456. <https://doi.org/10.1111/bcpt.13710>
- Porras Argüello, J. D. (2022). *Diseño de copolímeros basados en PEG-PCL para encapsulación de fármacos apolares*. Universidad Nacional de Colombia, Colombia. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/82137>

- Rodríguez-Martínez, J., Sánchez-Martín, M. J., López-Patarroyo, O., & Valiente, M. (2023). Novel cannabinoid release system: Encapsulation of a cannabidiol precursor into γ -cyclodextrin metal-organic frameworks. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 79(May 2022). <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2022.104085>
- Scuderi, C., Filippis, D. De, Iuvone, T., Blasio, A., Steardo, A., & Esposito, G. (2009). Cannabidiol in medicine: a review of its therapeutic potential in CNS disorders. *Phytotherapy Research*, 23(5): 597–602. <https://doi.org/10.1002/ptr.2625>
- Seltzer, E. S., Watters, A. K., MacKenzie, D., Granat, L. M., & Zhang, D. (2020). Cannabidiol (CBD) as a Promising Anti-Cancer Drug. *Cancers*, 12(11): 3203. <https://doi.org/10.3390/cancers12113203>
- Vargas, C. M. (2020). Cannabinoides y Nanomedicina. *Universidad de Sevilla, España, Facultad de Farmacia*. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/11441/103269>
- Villate, A., San Nicolas, M., Olivares, M., Aizpurua-Olaizola, O., & Usobiaga, A. (2023). Chitosan-Coated Alginate Microcapsules of a Full-Spectrum Cannabis Extract: Characterization, Long-Term Stability and In Vitro Bioaccessibility. *Pharmaceutics*, 15(3): 859. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15030859>
- Volmajer Valh, J., Peršin, Z., Vončina, B., Vrezner, K., Tušek, L., & Fras Zemljič, L. (2020). Microencapsulation of Cannabidiol in Liposomes as Coating for Cellulose for Potential Advanced Sanitary Material. *Coatings*, 11(1): 3. <https://doi.org/10.3390/coatings11010003>
- Wang, C., Cui, B., Sun, Y., Wang, C., & Guo, M. (2022). Preparation, stability, antioxidative property and in vitro release of cannabidiol (CBD) in zein-whey protein composite nanoparticles. *LWT*, 162(March): 113466. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113466>

Efectos de los diferentes parámetros y procesos sobre la resistencia al desgaste por deslizamiento de la familia Hastelloy.

Effects of different parameters and processes on sliding wear resistance of the Hastelloy alloys.

Ramón Alejandro López-Martínez¹, Lázaro Abdiel Falcon-Franco¹, Marco Arturo García-Rentería¹, José Lemus-Ruiz²

¹Facultad de metalurgia, Universidad Autónoma de Coahuila, carretera 57 km. 5, C.P. 25710, Monclova, Coahuila, México.

²Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, Avenida Francisco J. Mujica s/n, C.P. 58030, Morelia, Michoacán, México

Autor de correspondencia: lopezr@uadec.edu.mx

Resumen

En este documento se hace una revisión bibliográfica de trabajos de investigación y artículos realizados hasta la actualidad sobre los efectos de diferentes procesos como tratamiento térmico, corrosión, soldadura, y atmosferas controladas, sobre la resistencia al desgaste, con la variación de los parámetros de carga, distancia y velocidad de la familia Hastelloy. Actualmente existe muy poca información sobre el tema, ya que, las investigaciones se concentran principalmente en las propiedades mecánicas de la aleación dejando de lado su resistencia al desgaste. Dependiendo de los distintos parámetros y procedimiento la resistencia al desgaste se ve sumamente afectada tanto positiva como negativamente. Se resaltan las condiciones y procedimientos más relevantes para obtener mejoras en la resistencia al desgaste, además de los mecanismos de desgaste presentes en cada uno.

Palabras clave: Hastelloy, resistencia al desgaste, tratamiento térmico, corrosión, soldadura.

Abstract

In this document, a bibliographic review of research works and articles carried out to date is made on the effects of different processes such as heat treatment, corrosion, welding, and controlled atmospheres, on wear resistance, with the variation of load parameters, distance, and speed of the Hastelloy family. Currently there is very little information on the subject, since research focuses mainly on the mechanical properties of the alloy, leaving aside its wear resistance. Depending on the different parameters and procedure, wear resistance is greatly affected both positively and negatively. The most relevant conditions and procedures to obtain improvements in wear resistance are highlighted, in addition to the wear mechanisms present in each one.

Keywords: Hastelloy, wear resistance, heat treatment, corrosion, welding.

Introducción

Las aleaciones Hastelloy fueron creadas por haynes international. Son aleaciones que contienen una base de níquel, aleado con cobalto, cromo, y molibdeno.

Las aleaciones de la familia Hastelloy son costosas, pero tienen características muy particulares como alta resistencia a altas temperaturas (alrededor de 1100 °C), además, poseen muy buena resistencia a la corrosión y al desgaste. Es por estas características que se utilizan en turbinas de gas, motores de aviones, y también en reactores químicos. Las aleaciones de la familia Hastelloy son muy duras, pero a su vez son muy difíciles de maquinarse (usualmente se utiliza láser). Hay subtipos dentro de la aleación indicadas por letras y números.

Las propiedades anteriormente mencionadas hacen que estas aleaciones sean ampliamente utilizadas en diversos ámbitos, lo que hace que existan una amplia variedad de pruebas y parámetros que han ido variando con la época, un ejemplo es que en la actualidad se hacen pruebas mecánicas a dichas aleaciones previamente expuestas a atmósferas criogénicas.

Pero existe una propiedad de estas aleaciones que ha sido poco estudiada y esa es la resistencia al desgaste por deslizamiento, hay muy pocos estudios sobre la resistencia al desgaste de la familia Hastelloy, es por lo mencionado que este review recopilará los más recientes estudios sobre esta propiedad y se observará el comportamiento de las aleaciones de la familia Hastelloy ante este tipo de pruebas.

Pruebas de desgaste en seco.

Las pruebas de desgaste en seco son de suma importancia, puesto que gracias a ellas obtenemos una serie de datos de interés, entre ellos establecer una base preliminar para futuros ensayos con lubricante y con ello, permitir la comparación con otras investigaciones donde se utilizó lubricante, además, las pruebas de

desgaste deben de ser lo más parecido a las condiciones reales y existen aplicaciones en donde no se utiliza ningún tipo de lubricante.

Venkatesan y col. (2020) realizaron un estudio del rendimiento de la maquinabilidad de la aleación Hastelloy X. El estudio examina y realiza una comparación entre desgaste en seco y lubricación por cantidad mínima (MQL) en la propiedad de maquinabilidad de Hastelloy X con una deposición de vapor (PVD: TiAlN). Los resultados revelan que el 0.25 % en peso con MQL PVD mostró una mejora en la fuerza de giro (5-18 %), rugosidad (40-4 %), desgaste en la punta de la herramienta (37.5-9 %), coeficiente de fricción por (32-40%) (Venkatesan, 2020).

Un grupo de investigadores liderados por Calvin Samuel y col. (2022) estudiaron la microestructura, el rendimiento tribológico a alta temperatura y las propiedades mecánicas de la aleación Hastelloy X a la que se le aplicó un tratamiento de envejecido en solución. La microestructura después del envejecido en solución revela una microestructura bimodal α y β con precipitados α uniformemente dispersos en la fase de matriz β . Las pruebas de desgaste se realizaron a diferentes temperaturas (28, 250, 350 y 450 °C) en un tribómetro pin-on-disc. Los mecanismos de desgaste se evaluaron en la superficie desgastada utilizando un microscopio electrónico de barrido (MEB). Existe un desgaste abrasivo predominante en temperaturas de 28 y 250 °C, mientras que la oxidación y la delaminación son dominantes a temperaturas de 350 y 450 °C. Se formó un producto triboquímico (tribóxido) a 350 y 450 °C que proporciona una mejor resistencia al desgaste del material (Calvin Samuel y col., 2022).

Banamali y col. (2020) han abordado el análisis de corrosión y desgaste por deslizamiento de Hastelloy C276 para el desgaste por deslizamiento en seco contra un acero inoxidable EN 31(60 HRC) a 298°K. la fuerza de fricción, el coeficiente de fricción y la velocidad de desgaste en la superficie del material a diferentes distancias de deslizamiento se examinan en diferentes condiciones de carga. En la

prueba de desgaste con carga de 40 N, la tasa de desgaste se vio aumentada un 300% en comparación con las pruebas de 10 y 20 N. los resultados experimentales indicaron una reducción en los valores del coeficiente de fricción con el aumento de la carga normal. Las imágenes del microscopio electrónico de barrido (MEB) de la superficie desgastada confirman la aparición de delaminación y adhesión, esto hace que el material se retire de la superficie en el deslizamiento en seco (Banamali y col., 2020).

Anandakrishnan y col. (2020) estudiaron el comportamiento al desgaste en seco de la aleación Inconel 718 fabricada por DMLS. El comportamiento de desgaste de las muestras de Inconel 718 fabricadas por DMLS se investigó experimentalmente utilizando un pin-on-disk estándar. Entre los variados parámetros de desgaste, la carga se identificó como el parámetro más influyente en la velocidad de desgaste. Además, la caracterización realizada por microscopía electrónica de barrido reveló la presencia de varios mecanismos de desgaste entre los cuales el más predominante es el adhesivo (Anandakrishnan y col., 2020).

Un grupo de trabajo liderado por Singh y col. en el 2020 realizaron pruebas de resistencia al desgaste por deslizamiento en seco de los compuestos Ni-SiC desarrollados por fundición. La formación de compuestos intermetálicos duros y la presencia de refuerzo SiC produjeron una mayor microdureza. Las pruebas de desgaste en seco con diferentes condiciones de carga y velocidad revelaron la formación de tribolayers de óxido estable a 1.0 m / s de velocidad deslizante y 15 N de carga. La fractografía de muestras desgastadas reveló la abrasión de superficies en la condición de carga inferior (10 N). Sin embargo, al aumentar la carga, se observó el cizallamiento de las superficies debido a la adhesión. A cargas más altas (20 N) y velocidades deslizantes más altas (1.5 m / s), se observaron extracción de partículas y tres mecanismos de desgaste abrasivo (Singh y col., 2020).

Desgaste y corrosión

La integridad física y la composición de un material en estado sólido puede verse alterada en un ambiente corrosivo debido a la corrosión y desgaste de los materiales. Según un estudio de 2001 realizado en Estados Unidos, la lucha contra la corrosión de los materiales supone aproximadamente el 6% del producto interno bruto del país. Así, la corrosión es una importante consideración en muchos sectores industriales tales como el transporte, servicios públicos y la manufactura.

Sin embargo, existen aplicaciones en las que la oxidación o corrosión son buscadas para sacarles provecho. Por ejemplo, las superficies ultraplanas de obleas de silicio para chips de ordenadores se basan en procesos de corrosión y erosión químicas. También existen aplicaciones médicas que usan la degradación de ciertos biopolímeros para disolver suturas.

En un estudio mencionado en una de las secciones anteriores, Banamali Dansana y su equipo, aparte de las pruebas de desgaste en seco, estudiaron el comportamiento de desgaste por corrosión en ácido sulfúrico, el cual, mostró un valor significativamente menor de la tasa de corrosión (0.0016579 mm / a en H₂SO₄ solución) en comparación con otras aleaciones utilizadas con frecuencia a nivel industrial (Dansana y col., 2020).

Mecanismos de desgastes presentes en aleaciones Hastelloy.

Los mecanismos de desgaste se refieren a las formas en las cuales se presenta el desgaste y permite distinguir entre diferentes tipos de daños, los mecanismos de desgaste están regidos por normas, entre las cuales una de las más utilizadas en la norma alemana DIN 50320 que maneja cuatro tipos de desgaste que son adhesión, abrasión, reacción triboquímica y fatiga superficial.

Wang y Gao (2019) realizaron cálculos del factor de intensidad de la tensión para el desgaste por deslizamiento y la fatiga combinados de la superaleación HX basado en una simulación tridimensional. Propusieron una metodología de desgaste por fatiga por deslizamiento. Las características de propagación de grietas de la superaleación HX en condiciones de fatiga simple y desgaste por fatiga por deslizamiento se investigaron mediante pruebas de fatiga y MEB. Además, el análisis de desgaste se realizó con el programa de elementos finitos ABAQUS y el software de análisis de fractura tridimensional FRANC3D. Los factores de influencia de la tasa de crecimiento de grietas, incluida la tensión de flexión, la tensión de contacto y la profundidad de desgaste, se investigan en función del factor de intensidad de la tensión. Los resultados muestran que la resistencia a la fatiga se reduce severamente de 780 MPa a 200 MPa debido al desgaste. Los autores discutieron la existencia entre la fatiga y el desgaste y se concluye que la fatiga vence el efecto de resistencia del desgaste y ocupa la posición dominante después de que la cantidad de fisuras alcanzan un valor crítico. Sin embargo, el volumen y la profundidad del desgaste aumentarían el esfuerzo de fatiga y acelerarían la propagación de grietas (Wang & Gao, 2019).

Durante la investigación realizada por Sathisha y col. (2018) en la cual realizaron un estudio del desgaste por deslizamiento a alta temperatura en componentes de combustores de turbinas de gas. Se utilizó un tribaloy-800 basado en cobalto rico en molibdeno para abordar los problemas de desgaste y se estudió con mayor detalle. Se utilizó una configuración de desgaste por rozamiento personalizada para realizar la prueba de desgaste por deslizamiento grueso, ya que los experimentos de laboratorio estándar pueden no simular mejor los mecanismos de desgaste de campo. Las pruebas se realizaron a 550 °C bajo tensión constante hasta 3 millones de ciclos para producir una tasa de desgaste constante. Los datos de desgaste por fricción revelaron mecanismos de desgaste de tipo excoiación severa en este

material que conducen a una rápida eliminación del material de la superficie (Sathisha, 2018).

Resistencia al desgaste en soldadura.

La soldadura es un proceso de unión de materiales metálicos, usualmente logrado a través de la coalescencia (fusión), en la cual las piezas son soldadas fundiendo, se puede agregar un material de aporte, al usar calor en la soldadura se produce un cambio en la microestructura, además de una conducción del calor a través del metal, es por eso por lo que es necesario hacerle pruebas de desgaste para saber si existe algún cambio en la eficiencia del trabajo de la pieza.

Se han realizado pruebas por fusión con láser oscilante circular de una superaleación a base de níquel reforzada con WC, en el estudio realizaron el análisis de microestructura y resistencia al desgaste. Las principales fases de los recubrimientos compuestos son solución sólida de γ -Ni, WC, W₂C y M₆C. Las partículas de WC distribuidas uniformemente en la matriz GH3536 tienen los efectos del fortalecimiento por grano fino y el fortalecimiento por la dispersión. El mecanismo de desgaste cambia de desgaste adhesivo a desgaste abrasivo después de agregar WC. Las partículas de WC tienen protección física lo que la hace que sea más difícil de separarse durante las pruebas de desgaste y efectos de fortalecimiento por solución sólida, y mejoran la resistencia a la corrosión del revestimiento GH3536. Recapitulando, las ventajas del WC son que fortalecen el grano fino, cambia los mecanismos de desgaste lo que trae consigo mayor tiempo de vida, mejora la resistencia a la corrosión (Xia y col., 2021).

Faghani Gholamreza (2020) realizó un estudio para evaluar el comportamiento al desgaste, oxidación y corrosión de recubrimientos en las aleaciones Colmonoy 6, Inconel 625 y Hastelloy C276 soldadas por GTAW. La evaluación de la dureza, el comportamiento de desgaste y el mecanismo de desgaste de las muestras se realizó con el tribómetro pin-on-disc y usando imágenes SEM, respectivamente.

También se estudió el comportamiento de oxidación a alta temperatura a 1050 °C en 8 ciclos de 24 horas. Además, para investigar el comportamiento de corrosión de las muestras, se utilizó la prueba de polarización potenciodinámica en una solución de ácido sulfúrico y cloruro de sodio. El mejor comportamiento al desgaste se relacionó con Hastelloy C276 con un coeficiente de fricción de 0,28. Los estudios de morfología superficial de las muestras mostraron un cambio en el mecanismo de resistencia al desgaste del tipo por deslizamiento a adhesivo, al aplicar recubrimientos a base de níquel sobre el acero inoxidable 310. En la prueba de oxidación a alta temperatura, calcularon la ganancia de peso mínima para Hastelloy C276 (0,5 mg/cm²) (Faghani, 2020).

Desgaste en atmosferas criogénicas.

Las aleaciones de la familia Hastelloy han sido ampliamente utilizadas en la industria aeroespacial, industria donde se someten a ambientes altamente demandantes entre ellos a temperaturas criogénicas, es por ello por lo que se ha estudiado el comportamiento de estas aleaciones al ser expuestas a estos ambientes.

Ekambaram (2019) realizó un estudio de propiedades mecánicas y metalúrgicas de Hastelloy X en condiciones criogénicas (-196 °C). Los efectos fueron estudiados cuando el material fue tratado bajo 12 y 24h de temperatura criogénica, respectivamente. Los resultados indicaron que el Hastelloy X criotratado había conservado las propiedades mecánicas y metalúrgicas a temperatura bajo cero. encontraron una disminución del 10% en la dureza de las muestras tratadas criogénicamente en comparación con las muestras sin procesar, la disminución de la dureza provocó un aumento en la resistencia a la tracción de la muestra. El tratamiento criogénico aumento el tamaño del grano debido a la aparición de recristalización. Pero se confirmó con DRX que no hubo cambios importantes en la estructura del grano (Ekambaram, 2019).

Un equipo de investigadores liderado por Sitki A. realizó un experimento sobre la rugosidad de la superficie en la aleación Hastelloy C22. Este estudio evaluó la maquinabilidad de una súper aleación a base de níquel aleada con molibdeno utilizando insertos cerámicos tratados criogénicamente ($-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-145\text{ }^{\circ}\text{C}$) en condiciones de torneado en seco. Tres velocidades de corte (350, 400 y 450 m/min), tres velocidades de alimentación (0.1, 0.2 y 0.3 mm/rev), y se utilizó una profundidad de corte fija 1 mm en las pruebas de giro. Los experimentos se realizaron utilizando la matriz ortogonal Taguchi. Los factores que afectan la rugosidad de la superficie (R_a) se determinaron mediante análisis de varianza. Se investigó el efecto del tipo de tratamiento criogénico (superficial y profundo), la velocidad de corte y la velocidad de alimentación en la rugosidad de la superficie. Los resultados del análisis determinaron que la velocidad de alimentación era el parámetro principal que afectaba la rugosidad de la superficie y que el tratamiento criogénico profundo era más efectivo. El parámetro más efectivo que afectó la rugosidad de la superficie fue la velocidad de corte con una contribución del 57.9%. (Sitki, 2020).

En una colaboración entre Kesavan y Senthilkumar en 2020 en donde se realizaron pruebas sobre el mecanizado criogénico de la aleación Hastelloy C276 caracterizando su desgaste. La súper aleación exhibe un gran comportamiento de resistencia y fatiga cuando el níquel (Ni) está presente en grandes cantidades. Además, posee un buen comportamiento corrosivo resistente a altas temperaturas. En este trabajo, el mecanizado se realizó en Hastelloy C276 en diversas condiciones de mecanizado (velocidad, alimentación y profundidad) y entornos (secos y criogénicos). La maquinabilidad de Hastelloy C276 se investigó con fuerzas de mecanizado, temperatura, rugosidad superficial y dureza en diferentes condiciones de corte. Las fuerzas de mecanizado fueron mínimas bajo mecanizado criogénico debido a su efectiva propiedad de lubricación. El acabado superficial del área mecanizada mejoró en aproximadamente un 26% en condiciones criogénicas. Durante la investigación llegaron a la conclusión de que el mecanizado seco y

criogénico mejoró la dureza del material de trabajo. Además, se observaron adherencias y desgaste por abrasión mínimamente en el mecanizado criogénico en comparación con el mecanizado en seco. Pero no se observó una diferencia significativa en el desgaste de la muesca para ambos tipos de mecanizado (Kesavan & Senthilkumar, 2020).

Desgaste post tratamiento térmico

Los tratamientos térmicos son procesos de calentamiento y enfriamiento controlados en los cuales se obtienen cambios en la microestructura que provocan una mejora en las propiedades mecánicas. En las superaleaciones existen tres tipos de tratamientos térmicos como lo son envejecido, solubilizado y precipitación.

En el año 2019 se realizaron una serie de estudios por Jinoop y col. sobre el efecto del post-tratamiento térmico sobre la microestructura de Hastelloy X fabricadas mediante deposición de energía dirigida basada en láser. La microscopía óptica muestra microestructuras con dendritas finas en condiciones de construcción debido a una mayor velocidad de enfriamiento durante la deposición, mientras que se observan granos equiaxiales recristalizados después del tratamiento térmico posterior (a 1177°C) debido a la recristalización. La topografía de la superficie revela la reducción de la rugosidad media con el post-tratamiento térmico. Los estudios de pin-on-disk de ciclo único indicaron un aumento en la capacidad de almacenamiento de energía en un factor de 55% después del tratamiento térmico posterior. Además, los estudios de propagación de grietas indican una mejora en la vida de fatiga después del tratamiento térmico posterior, mientras que la tasa de desgaste específico aumentó en un 72% con una mayor delaminación en las muestras tratadas térmicamente (Jinoop y col., 2019).

Un equipo de investigadores liderados por Pauzi (2018) investigaron las características del desgaste presentes en la boquilla de combustible de turbinas de gas a diferentes temperaturas de contacto (25, 100, 200°C). El principal objetivo del

trabajo fue investigar el efecto tribológico sobre la pérdida de volumen y el coeficiente de desgaste de la superficie de contacto del revestimiento de combustión de la boquilla de combustible de la turbina de gas a diferentes temperaturas. El ensayo tribológico fue llevado a cabo utilizando un tribómetro pin-on-disk en condiciones de deslizamiento aplicando tres temperaturas de contacto diferentes a una velocidad de deslizamiento constante y una carga aplicada. Todas las pruebas se realizaron a una velocidad constante de 200 rpm, cargas aplicadas de 19.61 N y 156.91 N, y una distancia de deslizamiento de 100 mm. Las cargas aplicadas de 2 kg (19.61 N) es la carga exacta de la superficie de contacto en turbina de gas. Las superficies desgastadas se investigaron utilizando un microscopio electrónico de barrido (SEM) los tipos de desgastes encontrados son el abrasivo y el adhesivo. Al finalizar el trabajo encontraron una transición del mecanismo de desgaste al aumentar la temperatura. A baja temperatura, 25°C y 100°C, se presentó el mecanismo de desgaste adhesivo, mientras que cuando la temperatura llegaba hasta 200°C, el desgaste abrasivo era el mecanismo principal. El desgaste adhesivo y el desgaste abrasivo fueron el mecanismo predominante en las superficies de contacto entre la boquilla de combustible y el revestimiento de combustión (SS304-Hastelloy X tribopais) (Pauzi, 2018).

El efecto de diferentes rutas de tratamiento térmico fue estudiado por Osmar Custodio y col. (2022) Se probaron tres condiciones de tratamiento térmico: doble envejecido, solubilizado y doble envejecido, y homogeneizado, solubilizado y doble envejecido. Estas condiciones se compararon entre sí y con las muestras construidas. Las muestras solubilizadas y de doble envejecimiento exhibieron una característica recristalizada, sin embargo, aún contenían una estructura dendrítica. Mientras que las muestras homogeneizadas, solubilizadas y de doble envejecimiento deleitaban los granos equiaxiales con el reemplazo total de las dendritas. El coeficiente de fricción para todas las condiciones fue estadísticamente igual, sin embargo, las condiciones solubilizadas y de doble envejecimiento y

homogeneizadas, solubilizadas y de doble envejecimiento mostraron mejores resultados de pérdida de desgaste (alrededor del 25% inferior) en comparación con la condición de construcción, mientras que la condición de doble envejecimiento mostró resultados estadísticamente iguales en relación con los demás. Los mecanismos de desgaste eran predominantemente adhesivos para las condiciones construidas, adhesivos y abrasivos para las muestras de doble envejecimiento y en su mayoría abrasivos para las muestras solubilizadas y de doble envejecimiento y homogeneizadas, solubilizadas y de doble envejecimiento. Los resultados presentados confirmaron la necesidad de tratamiento térmico para mejorar la dureza del recubrimiento y, además, Se puede concluir que las diferentes rutas de tratamiento térmico no tuvieron impactos significativos en la resistencia al desgaste. Por lo tanto, es posible suponer que la ruta de doble envejecimiento es la más adecuada, desde el punto de vista de la resistencia al desgaste (Osmar y col., 2022).

Conclusiones

Con toda la información analizada en esta revisión se puede llegar a una serie de conclusiones generales de las aleaciones de la familia Hastelloy.

- En pruebas en seco, predomina el desgaste abrasivo, a temperaturas de 250 °C existe oxidación y delaminación como predominantes, además, a 35 0°C se forman capas de productos triboquímicos.
- La fatiga predomina a bajas cargas, al aumentar las cargas el desgaste se empieza a presentar.
- La resistencia al desgaste aumenta con el tiempo de envejecimiento debido a la mayor precipitación de la fase gamma principal.
- Los entornos criogénicos no suponen una caída en las propiedades mecánicas de la aleación, y solo disminuye en un 5% la resistencia al desgaste.

Bibliografía

Anandakrishnan, V., Sathish, S., Muthukannan, D., Dillibabu, V., & Balamuralikrishnan, N. (2020). Dry sliding wear behavior of Inconel 718 additively manufactured by DMLS technique. *Industrial Lubrication and Tribology*. 72(4): 491-496. DOI: <https://doi.org/10.1108/ILT-08-2019-0322>

Banamali, D., Mahapatra, T. R., Sahu, P., & Sahu, S. K. (2020). Tribological and electrochemical corrosion performance analysis of Hastelloy X under different loading conditions. *Materials Today: Proceedings*. 24(1): 1434-1444. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.462>

Calvin Samuel, S., Arivarasu, M., & Ram Prabhu, T. (2022). High-Temperature Solid Particle Erosion Behavior of Laser Powder Bed Fused Inconel 718. *Journal of Tribology*. 144(9): 705-720. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4054052>

Dansana, B., Mahapatra, T. R., Sahu, P., & Sahu, S. K. (2020). Tribological and electrochemical corrosion performance analysis of Hastelloy X under different loading conditions. *Materials Today: Proceedings*. 24(1): 1434-1444. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.462>

Ekambaram, P. (2019). Study of mechanical and metallurgical properties of Hastelloy X at cryogenic condition. *Journal of Materials Research and Technology*. 8(6): 6413-6419. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.10.048>

Faghani, G. (2020). Evaluation of Wear, Oxidation and Corrosion Behaviors of Nickel-Based Superalloy Coatings Fabricated by GTAW Method. *Iranian Journal of Surface*. Disponible en: https://www.iranjme.ir/article_95986.html. Fecha de consulta: enero 4, 2024

Jinoop, A. N., Denny, J., Paul, C. P., Kumar, J. G., & Bindra, K. S. (2019). Effect of post heat-treatment on the microstructure and mechanical properties of Hastelloy-X structures manufactured by laser based Directed Energy Deposition. *Journal of Alloys and Compounds*. 797: 399-412. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.05.050>

Kesavan, J., & Senthilkumar, V. (2020). Experimental investigations on cryo-machining of Hastelloy C-276 with tool wear characteristics. *Sādhanā*. 45(1): 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12046-020-01477-0>

Osmar, C., Pacheco, J. T., Veiga, M. T., Teixeira, M. F., da Silva, L. J., da Costa, C. E., & Milan, J. C. (2022). Effect of Different Heat Treatment Routes on the Tribological Behavior of the Inconel 718 Alloy Deposited on AISI 316 L by Laser Cladding. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*. 9(2): 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40516-022-00166-6>

Pauzi, A. A., Ghazali, M. J., Yunus, S. M., Zamri, W. W., Azhari, C. H., & Husin, S. (2018, September). Wear characteristics on gas turbine fuel nozzle-combustion liner contacting surface at different contact temperatures. In *Proceedings of Asia International Conference on Tribology 2018*. 2018: 40-42. Disponible en: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=LDFqDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA40&dq=Wear+characteristics+on+gas+turbine+fuel+nozzle+combustion+liner+contacting+surface+at+different+contact+temperatures&ots>. Fecha de consulta: 4 enero, 2024

Sathisha, CH. (2018). Materials Solutions to Address High Temperature Fretting Wear in Gas Turbine Combustor Components. In *Proceedings of TRIBOINDIA-2018 An International Conference on Tribology*. 13(1): 1-7. DOI: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3397894>

Singh, S., Gupta, D., & Kaushal, S. (2020). Dry sliding wear performance of Ni–SiC composites developed through an-in situ microwave casting process. *Journal of Tribology*. 142(10): 101704-101714. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4047032>

Sitki, A., Gökkaya, H., Akincioğlu, G., & Karataş, M. A. (2020). Taguchi optimization of surface roughness in the turning of Hastelloy C22 super alloy using cryogenically treated ceramic inserts. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: *Journal of Mechanical Engineering Science*. 234(19): 3826-3836. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954406220917708>

Venkatesan, K., Devendiran, S., Nishanth Purusotham, K., & Praveen, V. S. (2020). Study of machinability performance of Hastelloy-X for nanofluids, dry with coated tools. *Materials and Manufacturing Processes*. 35(7): 751-761. DOI: <https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1729990>

Wang, J., & Gao, Y. (2019). The stress intensity factor calculation for combined sliding wear and fatigue of GH4169 superalloy based on three-dimensional simulation. *Wear*. 436(1): 203012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203012>

Xia, Y., Chen, H., Liang, X., & Lei, J. (2021). Circular oscillating laser melting deposition of nickel-based superalloy reinforced by WC: Microstructure, wear resistance and electrochemical properties. *Journal of Manufacturing Processes*. 68: 1694-1704. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.074>

Revisión general del desgaste en seco bola en superficie en aceros microaleados al nb sometidos a tratamiento térmico de solución.

Review of assessment on ball on flat of wear on heat treatment microalloyed nb steel.

¹ Flores-Hernández David E.*, ¹ Soria-Aguilar M.J., ¹ García Guerra J., ¹ Carrillo-Pedroza F. R., ² León-Patiño C.A.

¹ Facultad de Metalurgia, Universidad Autónoma de Coahuila, Carretera 57 Km 5. Monclova, Coahuila, México. (866)639 03 30

² Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edificio "U", Ciudad Universitaria. Av. J. Múgica S/N, Col. Felicitas del Río, Morelos, 58030 Morelia, Michoacán, México. ([443316 83 55](tel:4433168355))

Correspondencia para: Flores-Hernández David Eliud, Correo electrónico:

floresdavid@uadec.edu.mx*

RESUMEN

Los aceros son aleaciones de hierro y carbono que contienen cantidades significativas de otros elementos de aleación. Existen una amplia variedad de aceros con distintas composiciones y, en consecuencia, diferentes propiedades mecánicas. Este estudio, se enfoca en los aceros microaleados, donde se mejora de manera notable sus características mecánicas mediante la adición de elementos de aleación, tales como el niobio. El objetivo es analizar cómo la incorporación de niobio afecta las propiedades mecánicas de un acero microaleado específico. Se sabe que el niobio tiene la capacidad de retrasar la recristalización de la austenita y el crecimiento del grano, lo que podría tener un impacto positivo en la microestructura del material y, en consecuencia, en las propiedades mecánicas resultantes. El primer paso implica mejorar la distribución de los precipitados de niobio en la microestructura del acero microaleado. Esto se consigue mediante tratamientos térmicos de solubilización a diferentes tiempos a una temperatura de 1150 °C, seguidos de un proceso de temple (enfriamiento rápido en agua a temperatura ambiente) con el fin de aumentar la resistencia del material, y en consecuencia, la resistencia al desgaste. El propósito principal de la técnica de desgaste, es determinar la cantidad de material perdido o la tasa de desgaste en los aceros microaleados modificados con niobio.

Palabras clave: Acero microaleado; Desgaste; Tratamiento térmico; Niobio.

ABSTRACT

Steels are alloys of iron and carbon that contain significant amounts of other alloying elements. There is a wide variety of steels with different compositions and, consequently, different mechanical properties. This study focuses on microalloyed steels, where their mechanical characteristics are significantly improved through the addition of alloying elements, such as niobium. The objective is to analyze how the incorporation of niobium affects the mechanical properties of a specific microalloyed

steel. Niobium is known to have the ability to delay austenite recrystallization and grain growth, which could have a positive impact on the microstructure of the material and, consequently, the resulting mechanical properties. The first step involves improving the distribution of niobium precipitates in the microstructure of the microalloyed steel. This is achieved through thermal solubilization treatments at different times at a temperature of 1150 °C, followed by a quenching process (rapid cooling in water at room temperature) in order to increase the resistance of the material, and consequently, the resistance to wear. The main objective of the wear technique is to determine the amount of material lost or the wear rate in microalloyed steels modified with niobium.

Keywords: Microalloyed steel; Wear; Heat treatment; Niobium.

INTRODUCCIÓN

Los aceros microaleados con niobio han ganado reconocimiento en la industria metalúrgica debido a sus excepcionales propiedades mecánicas y a su capacidad de mejorar la resistencia y la tenacidad. En esta revisión, se analizan las propiedades a través del tratamiento térmico de solubilizado y las aplicaciones de los aceros microaleados con niobio, destacando su influencia en la microestructura y el desempeño final del material. Además, se exploran los mecanismos mediante los cuales el niobio contribuye a mejorar la resistencia al desgaste de estos aceros. Esta revisión proporciona una visión integral de la importancia del niobio en la mejora de las propiedades de los aceros microaleados y su impacto en diversas aplicaciones industriales.

Se utilizó el software de “Litmaps”, el cual muestra un mapeo científico que permite visualizar las relaciones que se presentan a partir de las palabras clave seleccionadas y de nuevas palabras que aparecen, indicando el conocimiento relevante de los diferentes temas.

En este caso, el software permitió encontrar una relación de artículos en 4 mapeos realizados en diferentes búsquedas, que consistieron en:

1. Encontrar las coincidencias de artículos o trabajos realizados en aceros microaleados al niobio.
2. Recopilación de artículos relacionado a tratamientos térmicos de solución.
3. Identificación de artículos sobre desgaste en distintos aceros.
4. Recopilación de artículos relacionados a la técnica de desgaste ball on flat.

El niobio es un elemento de aleación que se ha utilizado ampliamente para mejorar las propiedades de los aceros. Los aceros microaleados con niobio mejoran la resistencia a la cedencia, la tenacidad, la ductilidad, la formabilidad y la soldabilidad. Su desarrollo ha contribuido a conocimientos metalúrgicos que permiten el control de las microestructuras y propiedades mecánicas, ya que los elementos se adicionan en pequeñas cantidades y se usan para formar carburos y modificar las propiedades. La excelente combinación de propiedades mecánicas hace de estos aceros una elección atractiva para muchas aplicaciones. El niobio es particularmente efectivo en la refinación de la microestructura y en la formación de fases duras que mejoran la resistencia y la durabilidad del material (Bejar y col., 2001).

El niobio actúa como un endurecedor eficaz en los aceros microaleados debido a su capacidad para formar carburos y nitruros de niobio en la microestructura. Estos precipitados finos aumentan la resistencia y la dureza del material sin comprometer su tenacidad. Además, el niobio retarda la recristalización durante el proceso de deformación en caliente, lo que resulta en una microestructura refinada y una mejora en las propiedades mecánicas. En la literatura se establece que la precipitación de los carbonitruros en la austenita, en particular el carbonitruro de niobio, inducida adicionalmente por la deformación durante el laminado en caliente, no produce endurecimiento; disminuyendo por tanto la cantidad del elemento

microaleante para la subsecuente precipitación en la ferrita (coherente o semi-coherentemente), considerada como la única responsable de contribuir al aumento de la resistencia en los mismos (Valencia y Kestenbach, 1998).

Los aceros microaleados con niobio han demostrado una notable resistencia al desgaste debido a varios mecanismos. La formación de carburos y nitruros duros de niobio en la microestructura contribuye a la formación de una capa superficial resistente al desgaste. Esta capa actúa como una barrera protectora durante la fricción y el deslizamiento, lo que aumenta la vida útil del material en aplicaciones sometidas a desgaste, la ductilidad de los aceros microaleados se ve favorecida y esto se ve atribuido al fenómeno de la recristalización dinámica (Chavez y col., 2021).

El tratamiento de solución es una etapa esencial en la fabricación de materiales metálicos, donde se busca lograr una microestructura homogénea y optimizar las propiedades mecánicas. A través de procesos térmicos cuidadosamente controlados, se logra una redistribución de los elementos de aleación disueltos en la matriz metálica, lo que tiene un impacto directo en las propiedades finales del material, así como obtener, mediante tratamiento térmico, la microestructura que permita alcanzar en el material las propiedades idóneas para su aplicación (Capdevila y col., 2011).

Existen varios métodos de tratamiento de solución, cada uno diseñado para abordar diferentes objetivos. El recocido de solución implica calentar el material a una temperatura por encima de la temperatura de solución, seguido de un enfriamiento controlado. Esto permite que los átomos de aleación se difundan y se disuelvan en la matriz metálica, creando una microestructura uniforme. El temple de solución, por otro lado, implica un enfriamiento rápido desde la temperatura de solución para mantener una solución sólida metaestable. Además, los procesos de precipitación controlada permiten la formación de fases intermedias que mejoran las propiedades

mecánicas, como la resistencia y la dureza, El objetivo de todos los tratamientos térmicos es lograr que los cambios estructurales se produzcan en las condiciones deseadas (Becerra y col 2021).

En la Tabla 1 se puede observar una breve revisión bibliográfica que trata específicamente sobre aceros microaleados.

Tabla 1. Revisión bibliográfica de aceros microaleados.

Referencia	Introducción	Método	Resultados
Salas y col (2019)	Interés en el desarrollo de nuevos materiales que ayuden a reducir la contaminación ambiental.	Se aplicaron diversos tratamientos térmicos como: Homogenizado a 1100 °C, Temple a 930 °C, Temple y Revenido a 930 °C, Recocido a 930 °C, Normalizado a 930 °C y Temple con partición a 1100 °C, en un acero experimental avanzado microaleado con boro.	Se evaluó la evolución del acero en fase de colada y una vez aplicados los tratamientos térmicos hubo una mejor templabilidad abriéndose así el campo a la austenita y demás microconstruyentes siendo el temple y el de partición, los que permitieron alcanzar altos valores de resistencia mecánica.
Fuentes y col. (2020)	Análisis comparativo de la microestructura, ancho de ZAC y dureza Vickers de uniones soldadas a tope GTAW-P robotizado, utilizando como variables a la corriente de	La posición de soldadura GTAW-P en placas HSLA para uniones soldadas a tope con doble cordón fue plana. Las placas se soldaron con ángulo de antorcha de 90° con electrodo tungsteno con óxido de cerio al	La mejor unión soldada GTAW5 presento dos cordones de soldadura con microestructura compuesta por granos alargados de ferrita primaria y agujas de martensita

	<p>soldadura, velocidad de soldadura, voltaje del arco y precalentamiento, con el fin de mejorar la soldabilidad, sanidad y calidad de estas uniones.</p>	<p>2% (CeO₂) con diámetro de 3.2 mm, longitud de arco pulsado de 2.5 mm, desplazamiento de soldadura tipo empuje, frecuencia de 20 Hz y velocidad de alimentación del alambre de 1.2 mm/s.</p>	<p>lenticular entre estos granos, produciendo la mayor microdureza promedio de 644 HV, mientras que la ZACR mostro ferrita de grano grueso y agujas de martensita, generando dureza Vickers alta de 597 HV.</p>
<p>Vélez (2021)</p>	<p>Analizar el cumplimiento de controles de calidad para la introducción de varillas de acero.</p>	<p>Se usaron variables de masa, fluencia y resistencia.</p>	<p>Evaluaron distintos métodos acordes a la literatura, siendo únicamente uno el que cubrió el análisis multivariable de (Masa, Resistencia y Fluencia).</p>
<p>García y col. (2022)</p>	<p>Analizar las transformaciones de fase que ocurren durante el tratamiento térmico de austemperizado en un acero avanzado de alta resistencia (AHSS) 0.41%C - 0.7%Mn - 2.15%Si - 0.013%Al, que se emplea en la industria automotriz para la fabricación de chasis y carrocería debido a sus óptimas propiedades mecánicas como</p>	<p>Realizaron tratamientos térmicos a 950 °C durante 72 minutos, seguido de un baño de sales fundidas a 310 °C durante 120 min y posteriormente enfriado al aire, las sales utilizadas fueron una mezcla de 45% NaNO₃ y 55% de KNO₃.</p>	<p>El tratamiento térmico de austemperizado dio como resultado un incremento en las propiedades mecánicas del material con una dureza de 61 HR30N y 1513 MPa de resistencia máxima en comparación a su estado inicial de 45 HR30N y 856 MPa.</p>

	absorción de energía de impacto y tenacidad.		
--	--	--	--

Tratamiento térmico

El tratamiento térmico de solución, es un proceso fundamental en la metalurgia que tiene un impacto significativo en las propiedades finales de los materiales metálicos. En esta revisión, se exploran los conceptos clave relacionados con el tratamiento de solución en metales, los procesos involucrados y los efectos resultantes en la microestructura y las propiedades mecánicas. Se analizan los diferentes métodos de tratamiento de solución, incluidos el recocido de solución, el temple de solución y la precipitación, se discute cómo estos procesos influyen en la homogeneidad, la resistencia y la tenacidad de los materiales. Así como también se proporciona una comprensión integral de la importancia del tratamiento de solución en la mejora de las propiedades de los metales y su aplicación en diversas industrias.

El tratamiento de solución es una etapa esencial en la fabricación de materiales metálicos, donde se busca lograr una microestructura homogénea y optimizar las propiedades mecánicas. A través de procesos térmicos cuidadosamente controlados, se logra una redistribución de los elementos de aleación disueltos en la matriz metálica, lo que tiene un impacto directo en las propiedades finales del material. El tratamiento térmico de solución consiste en calentar el metal rápidamente a una temperatura específica, mantenerlo a esta temperatura durante un tiempo para producir una solución sólida sobresaturada de fase alfa y luego templearlo (Marulanda y Zapata, 2007).

El tratamiento de solución tiene efectos profundos en la microestructura y las propiedades mecánicas de los metales. El proceso de redistribución de átomos de aleación lleva a una mayor homogeneidad en la composición química y la microestructura, lo que mejora la resistencia y la tenacidad del material. Los

tratamientos de solución también influyen en la formación de fases precipitadas, que pueden endurecer el material y mejorar su resistencia al desgaste, la adición simple o combinada de estos elementos microaleantes, originan en la matriz del acero partículas nanométricas de carbonitruros dispersas por mecanismos de endurecimiento por precipitación (Basanta y col., 2016).

El tratamiento de solución se utiliza en una amplia gama de aplicaciones industriales. En la industria automotriz, por ejemplo, se emplea para mejorar la resistencia y la durabilidad de componentes críticos como engranajes y bielas. En la industria aeroespacial, el tratamiento de solución es esencial para garantizar la integridad estructural de componentes sometidos a condiciones extremas. Además, en la fabricación de herramientas y maquinaria, el tratamiento de solución contribuye a mejorar la vida útil y el rendimiento de las piezas (Colombo y col., 2003).

En la Tabla 2 se hace una comparación sobre los tratamientos de solución a diferentes temperaturas en los aceros.

Tabla 2. Revisión bibliográfica de tratamientos térmicos de solución.

Referencia	Tratamiento térmico	Temperatura	Resultados
Ramírez y col. (2019)	Solución	1050 °C	La velocidad de corrosión disminuye cuando las muestras son sometidas al tratamiento térmico, también se mejora la resistencia a la corrosión.
López (2020)	Solución Recocido	1000 °C 475 - 800 °C	La resistencia a la corrosión tuvo una mejoría gracias a la aplicación de tratamientos térmicos, así como el desplazamiento del potencial (E _{corr}) en los ensayos de polarización potenciodinámica a potenciales positivos y la disminución en la velocidad de corrosión.

Altamiran y col. (2021)	Solución	1050 °C	El tratamiento permite modificar las condiciones microestructurales y disuelve los carburos que se presenten.
Guerrero (2022)	Solución Envejecido	1000 °C 720 °C	Observaron un notable cambio en el tamaño de grano, así como también en la cantidad de precipitados. También demostraron una mejoría en las propiedades químicas.
Perez (2023)	Solución	1000 °C	Se observó una austenización completa a una temperatura de 800 °C y una dureza más alta de 642 HV sobre la muestra tratada térmicamente.

Desgaste

El desgaste de los aceros es un fenómeno común y crítico que afecta a una variedad de aplicaciones industriales y mecánicas. En esta revisión, se analizan los mecanismos fundamentales del desgaste en aceros, así como el efecto de la microestructura, la composición química y las condiciones de operación en el proceso de desgaste. Además, se exploran diversas estrategias de mitigación del desgaste, incluidas modificaciones en la composición, tratamientos térmicos y recubrimientos superficiales. Esta revisión proporciona una comprensión integral del desgaste en aceros y cómo abordar este problema en diferentes aplicaciones industriales. El desgaste en aceros es una preocupación importante en aplicaciones donde el contacto y la fricción son comunes. Ya sea en rodamientos, herramientas, maquinaria o componentes estructurales, el desgaste puede tener un impacto negativo en la vida útil y el rendimiento de los materiales.

Uno de los factores que dificulta más la predicción del desgaste es que este no es una propiedad intrínseca del material, sino que depende del tribosistema en el cual

el cuerpo que se desgasta interacciona. El desgaste en aceros puede ocurrir a través de varios mecanismos, como el desgaste adhesivo, abrasivo, fatiga y por reacción triboquímica. El desgaste adhesivo implica la transferencia de material entre las superficies en contacto debido a la fricción, mientras que el desgaste abrasivo involucra la remoción de material debido a partículas duras que actúan como abrasivos. El desgaste por fatiga ocurre cuando se aplican cargas repetidas en un punto de contacto, y el desgaste por reacción triboquímica resulta de la acción combinada de corrosión y fricción (Torres, 2012).

Se presenta el desgaste adhesivo cuando el material es removido o desplazado por efecto que se da entre la interacción de las superficies de dos sólidos en contacto, que están sometidas a una carga y que se encuentran en movimiento relativo, este movimiento puede darse en una o varias direcciones (Tristacho y col., 2007).

La abrasión se define como la eliminación o desplazamiento de material de una superficie como resultado del contacto con otra superficie en movimiento relativo, la presencia de asperezas duras en dicha superficie, o la interacción con partículas duras desprendidas. En este proceso, se observan fenómenos como el corte y la deformación plástica de la superficie, o una combinación de ambos (Sierra y col., 2000).

El desgaste a la fatiga se refiere al deterioro gradual que experimenta un material debido a cargas repetitivas o vibratorias a lo largo del tiempo. Las estructuras de acero en puentes son propensas a este tipo de desgaste (Arango, 2004).

El desgaste resulta de esfuerzos tribológicos debido a reacciones químicas. Esto crea productos de reacción en las capas superficiales de los agentes de fricción que son depositados como capas intermedias (es decir, capas de oxidación) y son destruidos mecánicamente como resultado de movimientos relativos entre los cuerpos (Devia-Narvae y col., 2014).

La microestructura y la composición química de los aceros tienen un impacto significativo en su resistencia al desgaste. Los aceros con una microestructura fina y una distribución uniforme de carburos suelen exhibir mayor resistencia al desgaste. La presencia de elementos de aleación como el cromo y el vanadio puede formar fases duras que mejoran la resistencia al desgaste y la dureza superficial (Higuera y col., 2010).

Para mitigar el desgaste en aceros, se pueden aplicar diversas estrategias. La selección de una composición adecuada y la microestructura óptima a través de tratamientos térmicos son fundamentales. Además, los recubrimientos superficiales, como el recubrimiento con materiales duros o lubricantes sólidos, pueden reducir el contacto directo y minimizar el desgaste. La mejora de la lubricación y la implementación de técnicas de diseño que minimicen las cargas de contacto también son factores importantes, una alternativa para mitigar los problemas del desgaste de tales piezas conservando su brillo es la deposición de recubrimientos duros sobre la superficie de estos (Bejarano y col., 2010).

El ensayo ball-on-flat es una técnica importante para comprender la resistencia al desgaste de los materiales, permitiendo simular condiciones realistas de fricción y carga en una configuración controlada (Torres, 2012). A continuación, se describe la función del equipo, el cual consiste en una esfera que gira solidaria a un eje, la cual se apoya sobre la probeta formando un ángulo ligeramente desviado de la normal a la superficie (Tristacho y col., 2007). El estudio del desgaste se puede dar por condiciones secas y/o lubricadas (Sierra y col., 2000). En el contexto de los aceros, este ensayo proporciona información valiosa sobre el desempeño de los materiales en aplicaciones donde el desgaste es una preocupación crítica.

La evaluación del desgaste en aceros requiere la consideración de varios factores clave, así como también una evaluación crítica de los métodos de determinación del volumen de desgaste para pruebas tribológicas de deslizamiento alternativo lineal

ball-on-flat. La microestructura del acero, que incluye la distribución de carburos y la presencia de fases duras, influye en la resistencia al desgaste. La dureza superficial es otro parámetro crítico, ya que influye en la capacidad del material para resistir la penetración y la abrasión. Además, la composición química y las condiciones de ensayo, como la carga y la velocidad de deslizamiento, tienen un impacto directo en el desgaste (Arango, 2004).

El ensayo ball-on-flat es relevante en una amplia gama de aplicaciones industriales, desde la evaluación de aceros para rodamientos y engranajes hasta componentes estructurales en maquinaria pesada y automóviles. La capacidad de simular condiciones de contacto realistas y evaluar la resistencia al desgaste en un entorno controlado es esencial para garantizar la confiabilidad y la durabilidad de los materiales en operaciones industriales (Devia-Narvae y col., 2014).

Por otra parte, el ensayo de desgaste en el sistema "pin on disk" es el proceso mediante el cual se produce la pérdida de material en la superficie de un pin que se desliza sobre la superficie de un disco bajo condiciones controladas. Este sistema es comúnmente utilizado en investigaciones de desgaste para estudiar los diferentes mecanismos y factores que influyen en la erosión de materiales. Este ensayo está regido por la Norma ASTM G99 –95, los discos varían en tamaño, con diámetros que oscilan entre 30 y 100 mm y un grosor de 2 a 10 mm. Para simplificar la medición del desgaste y diseñar el disco, se ha optado por un diámetro de 115 mm y un grosor de 10 mm, siguiendo las especificaciones de los discos comerciales de desbaste (Quispe, 2020).

CONCLUSIONES

El desgaste es un fenómeno de deterioro de los materiales, influenciado por diversos factores como el entorno, la dureza de los materiales y sus composiciones, así como las velocidades involucradas de deslizamiento la cual es relativa entre las

superficies, En general, velocidades más altas pueden aumentar la fricción y la generación de calor, lo que conduce a un desgaste más rápido.

En el caso de los aceros diseñados para resistir la abrasión, se destacan variantes como los aceros microaleados, los aleados con manganeso, boro, niobio y cromo, que muestran una buena capacidad de resistencia en condiciones específicas.

Muchos estudios se centran en cómo los tratamientos térmicos, como el temple y revenido, pueden alterar la microestructura y, por ende, las propiedades del material, especialmente la dureza y la resistencia al desgaste.

La selección de los elementos añadidos a los aceros resistentes a la abrasión, junto con los tratamientos térmicos adecuados, depende del uso previsto del material y de los cambios deseados en sus propiedades.

AGRADECIMIENTOS

DEFH agradece al Posgrado en Ciencia y Tecnología de la Metalurgia de la Facultad de Metalurgia, Universidad Autónoma de Coahuila, y al CONAHCYT para la realización de los estudios de posgrado.

REFERENCIAS

Abedi, H. R., Fareghi, A., Saghafian, H., & Kheirandish, S. H. (2010). Sliding wear behavior of a ferritic–pearlitic ductile cast iron with different nodule count. *Wear*, 268(3–4): 622–628. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.10.010>

Alterach, M. A., Favilla, P. C., Rosenberger, M. R., Lamas, D. G., Ares, A. E., Schvezov, C. E. (2008). Resistencia al desgaste de recubrimientos delgados de TiO₂ para prótesis cardiacas. *Revista Anales AFA*, 20: 147 – 153.

Arango, C. C. (2004). Desgaste por deslizamiento en seco de aceros perlíticos y bainíticos. *Dyna*, 71(144): 17–27. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49614403>

Armenta, M. A., Cárdenas, E. E., Abundis, H. F., Martínez, A. I. (2021). “Diseño conceptual de un tribómetro lineal reciprocante”. MEMORIAS DEL XXVII CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM, P. 127 – 135.

Ayerdi, J. J., Aginagalde, A., Llavori, I., Bonse, J., Spaltmann, D., & Zabala, A. (2021). Ball-on-flat linear reciprocating tests: Critical assessment of wear volume determination methods and suggested improvements for ASTM D7755 standard. *Wear*, 470–471: 203620. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203620>

Basanta, G., Díaz, E., Mauco, S., Monsalve, A., González, G., & Rivas, A. (2016). Microscopía De Fuerza Atómica Aplicada A La Cuantificación De Nanoprecipitados En Aceros Microaleados Al Nb-V-Ti Tratados Térmicamente. *Acta Microscopica*, 25(1): 48-54. <https://acta-microscopica.org/acta/article/view/147>

Becerra-Rodríguez, M., Aguilar-Díaz, V. J., Bernardino-González, J., & Santana-Ramírez, F. (2021). Tratamientos térmicos. *TEPEXI Boletín Científico de La Escuela Superior Tepeji Del Río*, 8(15): 40–44. <https://doi.org/10.29057/estr.v8i15.6397>

Bejarano, G., Astrid, M., Osorio, J. A., Caicedo, J. C., & Garzón, G. H. (2010). Mejoramiento de la eficiencia de los moldes de inyección mediante la aplicación de

recubrimientos de CrN/TiN. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 30(1): 89–94. http://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0255-69522010000100011&script=sci_arttext

Capdevila, C., Mateo, C.G., Caballero, F.G., Cornide, J., San-Martín, D., & Andrés, C.G. (2010). Generación de microestructuras aciculares para obtener elevadas propiedades mecánicas en aceros. Actas del XII Congreso TRATERMAT: 13-20. <http://hdl.handle.net/10261/41809>

Chávez, J. G., Falcón, L. A., & Soria, M. J. (2021). Desgaste de aceros resistentes a la abrasión. *CienciAcierta*, (69): 162-177. <http://www.cienciacierta.uadec.mx/2021/12/16/desgaste-de-aceros-resistentes-a-la-abrasión/>

Colombo, G., Fuguet, F., & Saenz, L. (2003). Efecto del tratamiento térmico de envejecimiento a un acero microaleado tipo X-60. *Revista Ingeniería UC*, 10(2): 26-29.

Devia-Narvae, D. M., Mesa, F., & Devia Narvaez, D. F. (2014). Estudio de desgaste de láminas de acero deformadas con herramientas recubiertas. *Scientia Et Technica*, 19(4): 433-437.

Higuera, O. F., Moreno, C. M., & Ramírez, C. (2010). Efecto del precalentamiento y la severidad de temple sobre la resistencia al desgaste adhesivo del acero austenítico al manganeso. *Dyna*, 77(164): 76–87. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=s0012-73532010000400009&script=sci_arttext

Marulanda A., J. L., & Zapata M., A. (2007). Tratamientos térmicos aplicables a las aleaciones hipereutectoides zinc - aluminio con un 22 - 27% de aluminio. *Scientia Et Technica*, XIII(34): 507-512.

Quispe, D. L. (2020). Máquina de ensayo abrasivo PIN-ON-Disk por la norma ASTM G99. *Revista Multidisciplinaria de Desarrollo Agropecuario, Tecnológico, Empresarial y Humanista*, 2: 5. <https://dateh.es/index.php/main/article/view/44>

Sierra, H., García, C. A., Morales, J., Vélez, J. M. (2000). Relación entre desgaste y tenacidad para algunos aceros al carbono templados y revenidos a iguales niveles de dureza. *Revista Universidad EAFIT*, 36(117): 59–67. <https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/1042>

Torres, E. (2012). Introducción al estudio de los mecanismos de desgaste mecánicos. Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”. Matanzas, Cuba. pp. 1-20. <http://monografias.umcc.cu/monos/2012/Facultad%20de%20Ingenierias/mo12116.pdf>

Valencia, E., & Kestenbach, H. J. (1998). Origen y endurecimiento por dispersión de carbonitruros en un acero comercial microaleado al niobio y laminado en caliente. *Revista de Metalurgia*, 34(6): 488–498. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.1998.v34.i6.817>

Cisticercosis hepática... ¿una enfermedad desafiante?

Hepatic cysticercosis...
a challenging disease?

Mitzy Guadalupe Hernández Durán¹, Israel Becerril Gómez², Marisol Neri Sánchez¹.

Adscripción institucional:

¹ Universidad de la Salud del Estado de México (UNSA). Vialidad Toluca-Atzacomulco #1946, Colonia La Aviación Autopan, C.P. 50295, Toluca, Estado de México.

² Hospital General Dr. Nicolás San Juan. Doctor Nicolás San Juan, S/N, Colonia Delegación San Lorenzo Tepaltitlán, C.P. 50010, Toluca, Estado de México.

Correspondencia:

Marisol Neri Sánchez

Universidad de la Salud del Estado de México. Vialidad Toluca-Atzacomulco #1946, Colonia La Aviación Autopan, C.P. 50295, Toluca, Estado de México.

Correo: MarisolNeri@unsa.mx

Teléfono: 722 241 8960

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6069-2710>

RESUMEN

La cisticercosis hepática es una infección parasitaria causada por el parásito *Taenia solium* (*T. solium*) en su forma larvaria de *Cysticercus cellulosae* en el hígado, que se ha convertido en una enfermedad desafiante en el campo de la salud pública, puesto que, la manifestación de la enfermedad es poco común y es relevante por las consecuencias graves que se han presentado en las personas afectadas. El objetivo del presente escrito es identificar las manifestaciones clínicas frecuentes y complicaciones, los avances en el diagnóstico (hallazgos en estudios de imagen), los avances en el tratamiento y el manejo de la cisticercosis hepática con base en la literatura referida en reportes de caso que se han presentado alrededor del mundo.

Palabras clave: manifestaciones clínicas, complicaciones, diagnóstico, manejo, tratamiento, cisticercosis hepática.

ABSTRACT

Hepatic cysticercosis is a parasitic infection caused by the *Taenia solium* parasite in its larval form of *Cysticercus cellulosae* in the liver, it has become a challenging disease in the public health, because the manifestation of the disease is rare and is relevant due to the serious consequences that have occurred in affected people. The objective is to identify the frequent clinical manifestations and complications, the advances in the diagnosis (imaging studies), the advances in the treatment and management of hepatic

cysticercosis based on the literature referred to in case reports that have been presented around the world.

Key words: clinical manifestations, complications, diagnosis, management, treatment, hepatic cysticercosis

INTRODUCCIÓN

La cisticercosis hepática es una infección parasitaria causada por el parásito *Taenia solium* (*T. solium*) en su forma larvaria de *Cysticercus cellulosae* en el hígado, que está presente en la carne porcina infectada; es de importancia destacar, que dicha infección se presenta cuando los humanos comen carne de cerdo infectada, cruda, o con poca cocción, o bien en zonas o regiones donde la higiene es deficiente, principalmente en comunidades rurales de los países en desarrollo de África, Asia y América Latina. En 2015, el Grupo de Referencia sobre Epidemiología de la Carga de Morbilidad de Transmisión Alimentaria de la Organización Mundial de la Salud señaló que la *T. solium* es una de las principales causas de defunción por enfermedades que se transmiten por los alimentos (OMS, 2022). La cisticercosis hepática se caracteriza por la formación de quistes en el hígado, los cuales contienen las larvas del parásito y que pueden causar síntomas inespecíficos que vuelven a la enfermedad un tanto incierta en su diagnóstico, y por ende favorece a malos pronósticos en las personas que llegan a infectarse, por ello, se ha convertido en un enfermedad desafiante en el campo de la salud pública, puesto que, la manifestación de la enfermedad es poco común y es relevante por las

consecuencias graves que se han presentado en las personas afectadas, que ha dado lugar a realizar investigaciones para contar con un diagnóstico y tratamiento oportuno (Jiménez y col., 2020). En este artículo de divulgación científica se pretende brindar información acerca de las manifestaciones clínicas, diagnóstico, tratamiento y complicaciones de la cisticercosis hepática.

Etiología, transmisión y ciclo de vida de la *T. solium*

La cisticercosis es causada por *Cysticercus cellulosae*, el estado larvario del helminto *Taenia solium*, estas larvas son quistes con vesículas llenas de líquido que brindan la estructura de fijación del gusano en su interior mejor conocido como escólex (Jiménez y col., 2020). Por la naturaleza de transmisión, su ciclo de vida de la *Taenia* tiene dos importantes hospedadores, el cuerpo humano y los cerdos. Así, lo que ocurre es que los quistes son ingeridos por el ser humano de la carne de cerdo previamente infectada, donde el escólex se invagina (Figura 1), anclándose en la pared intestinal, donde madura en forma adulta, y pasa en forma de huevecillos que normalmente en heces de humano, vuelve a un ciclo con el agua que riegan en los animales y así infectar al porcino (Flisser y col., 2006).

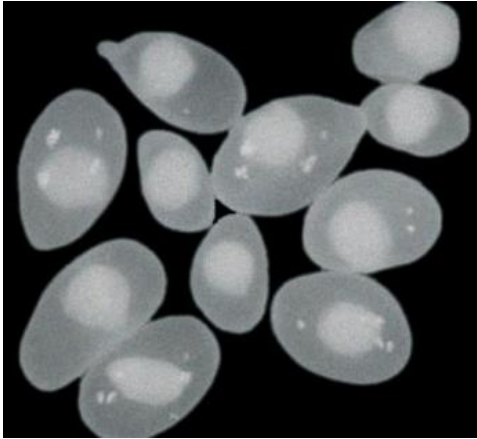


Figura 1. Se muestra una vesícula translúcida y llena de líquido que contiene un escólex invaginado del cisticerco (Flisser y col., 2006). URL: http://www.divulgacion.ccg.unam.mx/files/pdfs/por_que/Taenia_solium_un_parasito_cosmopolita.pdf

En comparación con las distintas formas de teniasis que hay como la relacionada con *Taenia saginata* (de la carne bovina) y *T. asiática*, la *T. solium* (porcinas) son más pequeñas, miden entre 2 y 8 metros de largo, producen un promedio de 1000 proglótides o gusanos, y cada uno de estos puede producir 50 000 huevos (Figura 2). Los huevos de la *T. solium* son de forma esférica, miden entre 30 y 45 micrómetros (CDC Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades, 2021).

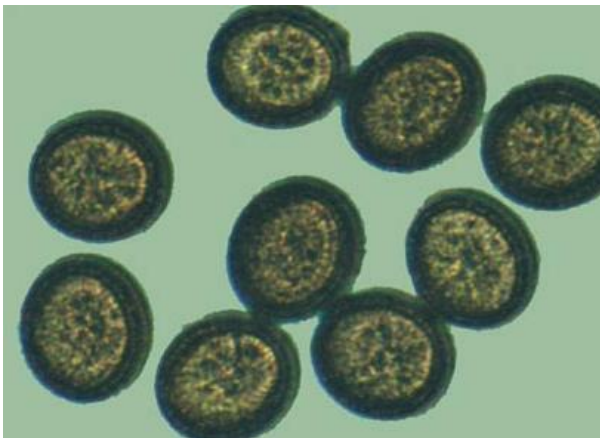


Figura 2. Se muestran los huevecillos de la *T. solium* vistos en un microscopio óptico (Flisser y col., 2006). URL: http://www.divulgacion.ccg.unam.mx/files/pdfs/por_que/Taenia_solium_un_parasito_cosmopolita.pdf

En estado adulto, la solitaria de la *T. solium* puede medir de dos a siete metros. Se trata de un invertebrado plano segmentado; los segmentos, o proglótides, cuando

están grávidos y por ende llenos de huevos, se expulsan con la materia fecal (Figura 3). La longitud de una proglótide viene a ser de medio centímetro (Flisser y col., 2006)

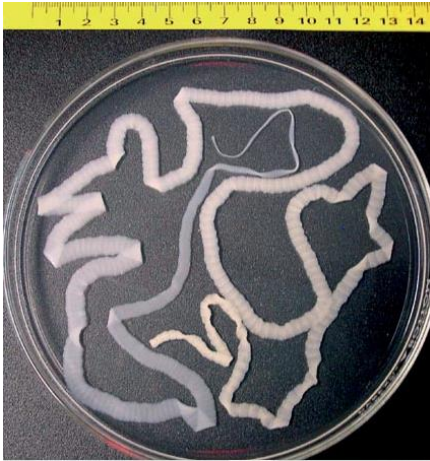


Figura 3. En esta imagen se muestra el tamaño aproximado de *T. solium* en estado adulto (Flisser y col., 2006). URL: http://www.divulgacion.ccg.unam.mx/files/pdfs/por_que/Taenia_solium_un_parasito_cosmopolita.pdf

Manifestaciones clínicas y complicaciones de la cisticercosis hepática

Con base en la literatura, los síntomas ocasionados por la cisticercosis pueden variar dependiendo de la cantidad de larvas presentes en la zona afectada, en este caso en el hígado, así también como de la respuesta inmunitaria que tenga el individuo (Olivares y col., 2018). Se observó que las principales manifestaciones clínicas incluyen: dolor abdominal con evolución de semanas o meses, náuseas, vómito, ictericia, fiebre y hepatomegalia (Jiménez y col., 2020).

En la Tabla 1 se muestra la comparación de algunos reportes de casos de infección por cisticercosis hepática a nivel mundial, así como las manifestaciones clínicas y su tratamiento.

Tabla 1. Comparación de reportes de casos de cisticercosis hepática.

Datos del paciente	Manifestaciones clínicas	Tratamiento	Pronóstico
Masculino de 65 años. Colombia (Jiménez y col., 2020)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Dolor abdominal inespecífico ○ Masa palpable en hipocondrio derecho (8 meses de evolución) ○ Deposiciones melénicas ○ Emesis 	Albendazol/ Praziquantel e inicio de uso de esteroides	Fallecimiento
Paciente femenina de 69 años. Bolivia (Olivares y col., 2018)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Lesiones cutáneas aflegmáticas ○ Hepatomegalia ○ Cefalea 	Albendazol Prednisona	Evolución favorable
Paciente masculino 28 años. India (Chaudhary y col., 2014)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Fiebre ○ Ictericia ○ Dolor abdominal de 2 meses de evolución ○ Hepatomegalia 	Albendazol y esteroides	Evolución favorable
Masculino de 14 años India (Sen y col., 2013)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Fiebre ○ Cefalea ○ Masas palpables en zonas como: pecho, glúteos y muslos ○ Hepatomegalia 	Albendazol	Evolución favorable
Paciente masculino 16 años India (Singh y col., 2012)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Dolor de cabeza ○ Emesis 3 meses de evolución ○ Masas palpables por todo el cuerpo ○ Fiebre 	Prednisona Albendazol Antiepilépticos	Evolución favorable

	<ul style="list-style-type: none"> ○ Mialgia ○ Artralgia ○ Hepatomegalia 		
Paciente masculino 25 años (Sathyanarayanan y col., 2011)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Cefalea ○ Vómito por 2 meses ○ Hepatomegalia 	Albendazol	Evolución favorable

A diferencia de la Neurocisticercosis, que es la forma más común de la infección por *T. solium*, que tiene las manifestaciones clínicas precisas, se puede observar que, en el caso del hígado es muy incierto y diferente, así también se deduce que tiene predominio en varones y que el común hallazgo clínico al momento de la exploración será la hepatomegalia, donde una vez encontrada, se indagará a cerca de las causas de esta (Sathyanarayanan y col., 2011).

Avances en el diagnóstico de la cisticercosis hepática

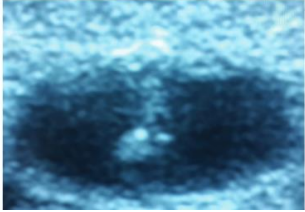
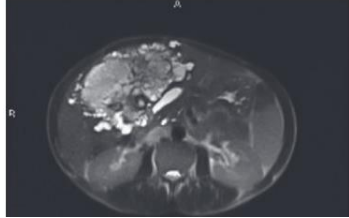
El diagnóstico se realiza por medio de una combinación de pruebas de imagen como la ecografía, la resonancia magnética o tomografía; principalmente la ecografía abdominal, ha sido de suma importancia y de gran utilidad, generalmente se tiene acceso a esta en los hospitales de segundo y tercer nivel, asimismo, permite evaluar el tamaño, la forma, margen, presencia o ausencia de escólex, inflamación circundante en tejidos, formación de abscesos/ y ubicación de la lesión, así se ha mostrado que mediante ella se pueden observar múltiples quistes hepáticos de diferentes tamaños y formas, donde incluso en algunos se observa la presencia del escólex (Ferrer, 2006). Además, los diferentes patrones que se han mostrado por

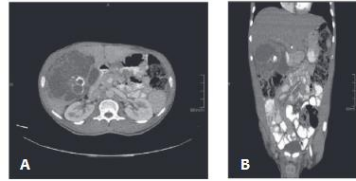
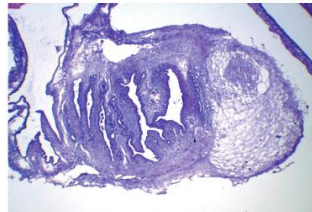
imagen pueden indicar la etapa de evolución de los quistes y el avance de la infección, esto ha contribuido a realizar un diagnóstico certero y conocer a fondo la magnitud del problema. La utilización de la técnica de biología molecular de PCR (Reacción en cadena de la polimerasa) en el diagnóstico de teniasis ha mejorado la detección especie-específico de los portadores de *Taenia* (Ferrer, 2006). El inmunodiagnóstico de cisticercosis basado en antígenos recombinantes y péptidos sintéticos ha mostrado resultados prometedores, mejorando la especificidad de las técnicas, sin embargo, hacen falta más estudios para la completa evaluación de estas nuevas herramientas y su aplicación en el diagnóstico de la enfermedad (Ferrer, 2006).

El COHEMI (Coordinating resources to assess and improve Health status of Migrants from Latin America) en un grupo de estudio, generó recomendaciones técnicas para el cribado de la cisticercosis y la teniasis, donde especificaba que sugería hacerlo en personas que presentaran epilepsia en áreas endémicas, en individuos con antecedentes de consumo de carne de cerdo poco cocida o zonas donde la enfermedad esta endémica, y usar resonancia magnética o tomografía computarizada (Zammarchi y col., 2017).

En la Tabla 2, se muestra una lista de los hallazgos en estudios de imagen que se han encontrado en la revisión de la literatura.

Tabla 2. Hallazgos en estudios de imagen por cisticercosis hepática

Tipo de estudio	Hallazgos	Imagen
Ecografía (Olivares y col., 2018)	Valoración de masa – hepatomegalía. Múltiples quistes hepáticos de diferentes tamaños y formas, algunos de los cuales mostraron la presencia del escólex -hiperecoicas	 <p>Foto 1.1: Se muestra una ecografía hepática con presencia de lesión quística con una imagen hiperecoica en su interior compatible con el escólex del parásito. (Olivares y col., 2018)</p> <p>URL: https://www.dermatolarg.org.ar/index.php/dermatolarg/article/view/1723/975 </p>
Resonancia Magnética (Jiménez y col., 2020)	Muestra múltiples lesiones y nódulos característicos de cisticercosis	 <p>Foto 1.2: Se muestra una Resonancia magnética en plano axial T2, con presencia de lesión quística multiculada de paredes y septos gruesos con contenido heterogéneo de predominio intenso. (Jiménez y col., 2020)</p> <p>URL: https://revistas.uis.edu.co/visores/Medicinas UIS Vol 33 Num 2/151568134015/ </p>

<p>Tomografía axial computarizada (TAC) (Jiménez y col., 2020)</p>	<p>TAC contrastado: muestra múltiples lesiones hipodensas en lóbulo derecho del hígado que se extienden en músculos.</p>	 <p>Foto 1.2: Se muestra una tomografía axial computarizada con medio de contraste oral y endovenoso en plano axial en la figura A y plano coronal en la figura B donde en el lóbulo derecho hay presencia de lesión quística multiculada de paredes y septos gruesos con calcificaciones dismórficas (Jiménez y col., 2020) URL: https://revistas.uis.edu.co/visores/Medicinas_UIS_Vol_33_Num_2/151568134015/</p>
<p>Hallazgos por tinción, etc. BIOPSIA (Olivares y col., 2018)</p>	<p>Muestra de imágenes quísticas del resto del parásito en el intesto</p> <p>Muestra en tejido celular subcutáneo forma quística con infiltrado inflamatorio</p>	 <p>Foto 1.3: Se muestra una imagen con tinción hematoxilina-eosina al 40X (HyE, 40X) con lesión quística con restos del tubo digestivo de parásito en su interior (Olivares y col., 2018) URL: https://www.dermatolarg.org.ar/index.php/dermatolarg/article/view/1723/975</p>

Avances en el tratamiento y manejo de la cisticercosis hepática

La literatura sugiere que el tratamiento farmacológico de elección son los medicamentos antihelmínticos como el albendazol (Chai y col., 2021) o la prazicuantel, en conjunto con terapia de esteroides, donde se ha mostrado excelente resolución completa de quistes y lesiones que presenta la infección (CDC, 2021; Jiménez y col., 2020; Sathyanarayanan y col., 2011) Se han propuesto otras alternativas de intervención que aún no han sido suficientemente evaluadas, como es el caso de vacunas contra la cisticercosis porcina; como ejemplo de ello tenemos dos antígenos provenientes de una biblioteca de cDNA de *T. crassiceps*, un antígeno recombinante y tres péptidos provenientes de *T. solium*, así como un complejo antigénico a partir de meta-cestodos de *T. solium* (Sarti, 1997). La cirugía se reserva en casos aislados de cisticercosis asociados con abscesos.

Epidemiología: importancia de la prevención y control de la cisticercosis hepática

La infección como previamente se había mencionado es principalmente desarrollado en zonas de escasos recursos y zonas de deficiencia en higiene. Se considera como una enfermedad endémica en regiones de América central, América del Sur, India, Asia y África. En México de acuerdo con el Instituto de Diagnóstico y Referencia Epidemiológica (InDRE), en el plan integral nacional para la eliminación de la transmisión de la *T. solium* en México destaca que las notificaciones oficiales han disminuido del número de casos reportados de teniasis donde de 12, 807 en

1988 disminuyó a 153 en 2015 mientras que, para cisticercosis de 564 casos en 1988 a 239 en 2015. Considerando que los datos de la prevalencia de la teniasis y de la cisticercosis indican un descenso en el número de casos, se ha planteado en diversos foros la necesidad de tener una estrategia que incluya desde saneamiento de las localidades hasta la quimioterapia de las poblaciones humanas porcinas, implementando mediadas de intervención como educación en salud, mejoramiento en la crianza de los cerdos, inspección de la carne de origen porcino para consumo humano y vacunación porcina, entre otras (de la Rosa-Arana, 2018).

CONCLUSIÓN

La prevención de la cisticercosis hepática (y otras infecciones relacionadas con la transmisión de *T. solium*) implica mejorar la higiene y el saneamiento, puesto que la educación sobre prácticas adecuadas de higiene, como lavarse las manos antes de comer y después de usar el baño, promover la eliminación segura de las heces humanas para evitar la contaminación del entorno y cocinar adecuadamente la carne de cerdo, son fundamentales para prevenir la infección.

Por otro lado, la cisticercosis hepática es una enfermedad parasitaria que representa un desafío significativo para la salud pública en muchas partes del mundo, incluyendo en México, debido a su amplio espectro de presentación y los pocos casos reportados en la literatura; sin embargo, como se pudo observar en la revisión de los casos, en general, la cisticercosis hepática tiene un buen pronóstico si es diagnosticada a tiempo.

REFERENCIAS

CDC, Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades. (2021).

Taeniasis—Epidemiología y factores de riesgo. Parásitos. [En línea].

Disponible en: <https://www.cdc.gov/parasites/taeniasis/es/hcp/index.html>.

Fecha de consulta: 6 de noviembre de 2023.

Chai, J.-Y., Jung, B.-K., & Hong, S.-J. (2021). Albendazole and Mebendazole as Anti-Parasitic and Anti-Cancer Agents: An Update. *The Korean Journal of Parasitology*, 59(3): 189-225.

Chaudhary, V., Bano, S., Kumar, P., Narula, M. K., & Anand, R. (2014). Hepatic cysticercosis: A rare entity. *Abdominal Imaging*, 39(6): 1182-1185.

de la Rosa-Arana J. L., Carpio-Pedroza J. Carlos., Meza-Lucas A., Alcántara-Anguiano I., García-Rodea R., Carrillo-Becerril B. L., & Córdova-Hernández Y. (2018). El InDRE en el Plan Integral Nacional para la eliminación de la transmisión de *Taenia solium* en México, en publicaciones de la *Secretaría de Salud*. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/salud/acciones-y-programas/el-indre-en-el-plan-integral-nacional-para-la-eliminacion-de-la-transmision-de-taenia-solium-en-mexico?state=published>. Fecha de consulta: 27 de noviembre de 2023.

- Ferrer, E. (2006). Teniasis/Cisticercosis: Avances en diagnóstico inmunológico y molecular. *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*, 46(1): 1-13.
- Flisser, A., Vargas-Parada, L., & Laclette, J. P. (2006). Taenia solium: Un parásito cosmopolita. *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*, 24: 24-33.
- Jiménez, G. A., Sabogal Olarte, J. C., & Upegui Jiménez, D. (2020). Cisticercosis hepática: A propósito de un caso y revisión de la literatura. *Médicas UIS*, 33(2): 101-108.
- Olivares, L. M., Bennesch, A., Fischer, J., Coringrato, M., & Maronna, E. (2018). Cisticercosis cutánea y hepática diseminada en una paciente con infección por HTLV-1. *Dermatología Argentina*, 24(2): 108-110.
- OMS, Organización Mundial de la Salud. (2022, enero 11). Teniasis y cisticercosis, en *publicaciones de la OMS*. [En línea]. Disponible en:
<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/taeniasis-cysticercosis>.
Fecha de consulta: 17 de noviembre de 2023.
- Sarti, E. (1997). La teniosis y cisticercosis por Taenia solium. *Salud Pública de México*, 39(3): 225-231
- Sathyanarayanan, V., Sambhaji, C., Saravu, K., Razak, A., Polnaya, A., & Rao, S. (2011). A rare case of hepatic cysticercosis. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 1(1): S139-S140.
- Sen, K., Karmakar, P., Bandyopadhyay, A., Santra, T., & Sarkar, M. (2013). Cysticercosis involving muscles and liver only: A yet unknown entity. *Annals of Tropical Medicine and Public Health*, 6(3): 350.

Singh, N., Singh, D. K., Parihar, A., & Singh, R. (2012). Disseminated cysticercosis: Rare manifestation of a common disease. *Case Reports*, 2012(1): bcr2012007876.

Zammarchi, L., Bonati, M., Strohmeyer, M., Albonico, M., Requena-Méndez, A., Bisoffi, Z., Nicoletti, A., García, H. H., Bartoloni, A., & The COHEMI Project Study Group. (2017). Screening, diagnosis and management of human cysticercosis and *Taenia solium* taeniasis: Technical recommendations by the COHEMI project study group. *Tropical Medicine & International Health*, 22(7): 881-894.

El paradigma de la educación a distancia: Clases Digitales desde diferentes perspectivas. Transformaciones socioculturales en el marco de la cultura digital. Prácticas y actores educativos.

Current paradigm in virtual classes: Digital classes from different perspectives. Sociocultural transformations under the scope of digital culture. Educational actions and practices.

Jorge Sadi Durón

Facultad de Ciencias Políticas y Sociales.

Universidad Autónoma de Coahuila, Unidad Torreón, Carretera Torreón-

Matamoros km. 7.5 Ejido el Aguila. C.P. 27087. Ciudad Universitaria.

Autor de Correspondencia:

jorge_sadi@uadec.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0003-2614-5462>

RESUMEN

Gracias al avance de la tecnología en sistemas de computo y plataformas virtuales, así como en calidad de internet, se ha podido generar en poco tiempo lo que se soñaba como el futuro: Clases Virtuales totales. El paradigma del desarrollismo se desmorona, ante el reto del COVID 19. Las brechas digitales, socioeconómicas y las carencias en habilidades y competencias en equipo y software, ha hecho que más de uno desista y abandone. Lo que otrora se usaba para el ocio, ahora son parte del instrumental de enseñanza-aprendizaje: teléfonos inteligentes, computadoras, plataformas de redes sociales, software de edición de audio, video y foto, etc. Algunos de los estudiantes en la materia de Edición de Programas, encontraron las limitantes del desarrollo profesional desde la clase a distancia. El docente aplicando la acción discursiva radiofónica a la clase, transformó un ejercicio teórico de un guion escrito, a acción discursiva radiofónica y transmedia, enseñando las prácticas desde el habitus y el lenguaje de la radiodifusión. Esto en trabajo de equipo en tiempo real, a través de la plataforma TEAMS de tipo audiovisual, pero en formato del lenguaje radiofónico. El resultado fue un ejercicio clave para innovación en la educación como experiencia interdisciplinaria y transmediática para construir estrategias desde los agentes de la educación y su relación dialéctica, desde TEAMS.

Palabras-Clave: Divulgación de la ciencia, radiodifusión, medios de comunicación, competencias educativas.

ABSTRACT

With the development of better virtual platforms, computing systems, and internet quality there has been a fast advance onto our previous future perspective: a fully virtual class. The current development paradigm has weekend facing the COVID-19 pandemic. The differences in socioeconomic backgrounds and familiarity

with digital tools have drawned individuals to quit. Tools that were once used for entertainment (smartphones, computes, social networks, audio-video editing software) are now a part of the teaching-learning process. Some students in the subject of "Program edition" have encountered limitations with these virtual classes, in the meantime, the teacher transformed theoretical excercises into a scipt, applying radiophonic discursive actions and transmedia, teaching all these practices from the habitus and formal speaking in radio broadcasting. These activities were managed with the TEAMS platform, as a real-time interaction, but using radiophonic language. The result was a TEAMS based excercise which ended up being key to the innovation of education as an interdisciplinary and transmediatic experience, building strategies from the education agents and their dialectic relationship.

Keywords: Popularization of science, broadcast, mass media, competency-based teaching.

INTRODUCCIÓN

Previo a la pandemia, se desarrolló un curso de competencias radiofónicas, con base a la epistemología genética y la teoría de sistemas complejos, con miras a la divulgación de la ciencia. Incluyendo las formas de abordarla con los estudiantes de comunicación, en convergencia con los profesionales de medios. Modelo que surge de la tesis doctoral: La radiodifusión universitaria en Coahuila: un modelo de la acción discursiva radiofónica, ya presentada, de la cual se han publicado avances en diversos congresos, revistas y publicaciones de capítulos de libros. Desde esta experiencia como problema educativo, y desde la aplicación de la construcción del conocimiento de forma interdisciplinaria y de innovación tecnológica se conformó un taller sobre acción discursiva radiofónica para divulgación de la ciencia. Esto fue con alumnos de quinto a noveno semestre de comunicación; así como se invitó a profesionales de la radio, docentes de comunicación e investigadores. De ahí nace una comunidad emergente de conocimiento local para la divulgación de la ciencia y la cultura (COMEMCOM: DCYC), aún funcional. La cuál abriría las puertas para el desarrollo de la Comunidad de Artes, Humanidades, Ciencia y Tecnología Universitaria, al Servicio de la Sociedad: CAHCTUSS-CIJE. Convocatoria para espacios de acceso universal de conocimiento desde los Jardines etnobiológicos, de CONACYT-FORDECIT 315548, la cual fue ganada, y obtenido recurso por 1,500,000.

Esta investigación, es diferente al paradigma cualitativo vs cuantitativo, no existe una hipótesis previa que destacar o una sola variable, sino que es, entre la serie de aproximaciones al objeto-sujeto de estudio, que se va construyendo la información, el conocimiento y la comunicación, a forma de construcción metodológica desde la cibercultur@ con arroba (González, 2018). El sustento epistemológico viene desde la teoría de los sistemas complejos (García, 2006), y la epistemología genética de Piaget (Piaget y col., 1981) y sus equilibraciones (Piaget, 1998).

El acercamiento a los medios y las aulas es con la base teórica de la acción discursiva radiofónica (Sadi & Zapata, 2020) y la cibercultur@ (Almaguer, 2013) Entendiendo por comunidad emergente de conocimiento **(CEC)** Aquella que: “Contempla el desarrollo de nuevas habilidades para trabajar con la información, con el conocimiento y con la comunicación, potenciadas por la tecnología como plataforma generativa de conocimiento. Para formar una CEC... es ideal contar con tres perfiles: de investigación, gestión y de manejo tecnológico” (Maáss y col., 2012).

Este es un estudio de caso, que sucede precisamente en la construcción de soluciones para la conformación de equipos de trabajo para la divulgación de la ciencia y la cultura. Pero, que adaptada al aula, también permite construir aprendizajes significativos, con base, en acciones y reestructuraciones de los esquemas de acción, preconcebidos y paradigmas, tanto de los medios como de la educación.

ESTADO DE LA CUESTIÓN DE LA APLICACIÓN DE LA ACCIÓN DISCURSIVA RADIOFÓNICA PARA CLASES

Al ser un modelo nuevo, que intenta ir demostrando su efectividad, a través de la implementación de lo que podríamos llamar, un modelo similar al de investigación-acción (Behar Rivero, Daniel, 2008). Pero desde el paradigma de la epistemología genética y la teoría de sistemas complejos. Que permite construir una estrategia metodológica propia, basado en los capitales y trayectorias sociales de los miembros que integran el grupo objeto de estudio. No es necesario grandes cantidades de agentes para desarrollar la investigación. Por ello las características de nuestro estudio, es similar a los estudios de complejidad desde Piaget, los cuales, aplican una metodología y marco teórico interdisciplinario, que no está presente de la misma forma en otras investigaciones.

Así, una investigación similar fue el proyecto de taller de divulgación de la ciencia: “Competencias Radiofónicas para la Divulgación de la Ciencia” que se presentó en el Consejo mexicano de ciencias sociales del 2019 (COMECSO, 2019). Fue un producto que se desarrolla a partir de la necesidad de contar con recursos humanos, tanto como conceptuales para que desde los docentes-investigadores,

los profesionales de los medios de comunicación (prensa, radio, tv, internet), así como los estudiantes de comunicación de la FCPyS UAdeC, con la divulgación de la ciencia, en forma de interacción interdisciplinaria, con un lenguaje común para todos permitiendo el intercambio y construcción de conocimientos desde el hábitus y las trayectorias y capitales simbólicas, culturales, económicas y sociales de los agentes de los diversos campos de conocimiento. Así los agentes crean sus propias formas narrativas de divulgación de la ciencia (Negrete, 2012), desde sus preconstrucciones cognitivas (Haidar, 2006) y Jean Piaget con su constructivismo desde lo citado por Grigori (1999) como lo “operatorio, lo imaginativo y lo abstracto”. (Grigori, Waldemar, 1999)

Este taller se desarrolló durante una semana, 20 horas prácticas y teóricas, sirvió no solo para que tuvieran un primer acercamiento al campo de la divulgación, sino para establecer una comunidad emergente de conocimiento (CEC), que intercambiara experiencias dentro de sus campos de acción social y la racionalidad comunicativa de cada uno de ellos como sujetos biopsicosociales en el espacio social: la academia, estudiantes, la ciencia e investigadores, tanto medios privados como públicos en radiodifusión, prensa, televisión, internet, entre otros. Preocupados porque la formación en divulgar la ciencia o comunicarla es escasa en los centros educativos, y en el área de radiodifusión universitaria todavía más, teniendo de 1 a 2 programas en promedio (Vázquez & Parejo, 2015).

Así el modelo, en este taller de competencias radiofónicas, que fue el espacio para dar resultados empíricos válidos a nuestras prácticas interdisciplinarias, donde se aplicó la “Acción discursiva radiofónica”. Mostró, que era viable construir recursos didácticos a partir de la campaña “Sororizate: empoderamiento auditivo”. La cual se presentó como serie de 7 capsulas radiofónicas en radio universidad 89.5fm en Torreón y 104.1fm en Saltillo y en *spotify* a través del podcast “La tacita de café” en 2020. Esto nos ayudó a comprobar que el modelo y estrategia es funcional, con la ayuda de los estudiantes de comunicación, sociología y ciencia política.

Así el objetivo de ese ejercicio fue simple, no sólo desarrollar productos auditivos y/o transmediáticos. Sino crear grupos y redes duraderas de intercambio de información, conocimiento y comunicación científica, que, como creadores de conocimientos, desde sus propios lenguajes específicos de desarrollo socio cognitivo, conformen nodos y redes de intercambio, para la divulgación de la ciencia de sus espacios académicos y de comunicación de la ciencia con las audiencias activas que participen de ello. Con la aproximación teórica de la acción discursiva radiofónica y la metodología de la *Cibercultur@* (Maáss y col., 2012). Algunos alumnos de comunicación participaron y tuvieron la oportunidad de compartir estas experiencias.

Esto nos llevó a aplicarlo en el contexto educativo, que trajo la pandemia, pensando en el problema objeto de estudio de enseñar a “hacer radio” sin estar físicamente en las “instalaciones de radio” de la licenciatura de comunicación, cerradas por la cuarentena. El reto era enseñar a hacer radio a partir de las acciones a distancia, a través de un modelo que lo permitiera. Los libros respecto a la radiodifusión tradicional o los manuales a la mano en la Universidad Autónoma de Coahuila no tenían contemplado esta situación, transmediática. Lo cual generó varios problemas y variables múltiples, que, desde una sola visión paradigmática de la clase convencional, o la radiodifusión convencional, resultaba difícil de superar. Esta investigación se hizo para dejar expresados, el cómo hicimos para facilitar el aprendizaje de la materia de “edición de programas”, dónde se desarrollan proyectos prácticos de Radio y Televisión. Pero que puede replicarse para abordar múltiples temas de otras asignaturas, incluso en otras licenciaturas o ingenierías.

CONTEXTO EMPÍRICO DE LO EDUCATIVO EN LA PANDEMIA.

En marzo 28 de 2020, el semestre enero-junio estaba a la mitad de su desarrollo. La materia teórico- práctica de “Edición de programas”, del octavo semestre de la carrera en comunicación en especialidad Producción de Medios, de la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, se desarrollaba con un total de 20 alumnos. Justo en la entrada a la cuarentena, la universidad tuvo que cerrar sus aulas.

Los docentes y estudiantes debieron terminar ante las circunstancias empleando los grupos de Facebook como repositorios de material (algunos ya lo hacían desde antes), *WhatsApp*, para una rápida comunicación ante las dudas. El uso de *Zoom*, de *Meets* y otras plataformas de videoconferencia en lo que se trazaba una estrategia para no perder el semestre. Ese semestre termino con esas plataformas además de los correos electrónicos que, desde hace algunos años, han servido para enviar tareas y trabajos, para sustituir el uso de papel, como parte de los ejercicios de ecología. Asimismo, se realizaron grabaciones en el *YouTube* personal de algunos docentes a forma de tutoriales (Sadi, 2020).

Una vez terminado el semestre, oficialmente en mayo, y aplicados al inicio de junio los exámenes virtuales. La universidad invito a los maestros a uniformizar el uso de una misma plataforma la de “Teams” de Microsoft. Mismo que fue un esfuerzo que se llevó en el periodo vacacional. Esto porque la universidad cuenta con 36,319 estudiantes entre bachillerato licenciatura y postgrado, distribuidos en 3 unidades en 15 municipios (de 38) a lo largo del Estado de Coahuila: Torreón con 22 Unidades académicas, Saltillo con 30 y Norte 20, con un total de 72 (incluidos los centros de investigaciones). Con 14 planteles de bachillerato (2 sistema abierto), 87 licenciaturas (2 a distancia), 59 postgrados (9 Especialidades, 40 Maestrías y 10 doctorados -24 PNPC-), 8 centros de investigación, 3 hospitales Universitarios, y

con un total de 3213 docentes, 1077 de tiempo completo y 2136 de tiempo parcial (SIE, 2020).

El resultado de la invitación fueron capacitaciones de 3 semanas en el uso de la plataforma Teams, en el periodo vacacional, el usar exclusivamente el correo institucional para maestros y estudiantes. Lo cual fue un cambio radical, y cierta reticencia del personal académico, debido a la brecha generacional y tecnológica. Además de evidenciar la falta de equipo de cómputo e internet de muchos docentes y más aún de los estudiantes.

En el caso de la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, en Torreón, la carrera de comunicación tiene una baja tasa de maestros de tiempo completo (5) y 35 de maestros por horas para 300 estudiantes en promedio (Comunicación, 2020). En este tenor investigadores en el área de investigación registrados en la Dirección de Investigación y postgrado de la Universidad Autónoma de Coahuila, registra siete investigadores, de los cuales sólo uno es directamente del área de comunicación (DIP, 2020).

Lograr que la capacidad de enseñanza-aprendizaje en plataforma virtual fue y sigue siendo, tanto de docentes como de estudiantes, un problema complejo. Abordable desde múltiples variables, que no se responden sin interdisciplinariedad y una visión epistemológica compleja. Es un problema tanto para docentes cómo estudiantes y administrativos.

Problemas de tipo técnico como la conectividad y la tecnología necesaria para desplegar y usar la plataforma *Teams*; el desarrollo de habilidades para usarla, tanto en docentes como estudiantes; el dominio de estos sistemas de cómputo, la adaptabilidad de materias prácticas de manera remota, el cambio de las dinámicas de lo presencial a lo virtual; los problemas económicos que lleva a muchos estudiantes a trabajar en horarios de las materias y recuperar en video las clases después; la falta de recursos económicos para solventar los gastos del uso de internet y del equipo adecuado.

Así como la adecuación de las materias de forma que motiven o permitan aclarar dudas y percepción del conocimiento adquirido. Claro otros problemas como la separación del espacio personal del educativo, entre ellos incluidos la invasión del espacio privado del hogar y sus dinámicas. Así como la pérdida de la salud propia o hasta la vida de familiares de los estudiantes y docentes, o de los propios docentes y estudiantes. Además de las multitareas compartidas del hogar, el estudio, el ocio y el trabajo.

PROBLEMÁTICA

En este contexto, la materia de edición de programas es una materia que requiere mucha organización y trabajo en equipo. Los jóvenes, desmotivados por la

pandemia, y los problemas derivados que ya hemos mencionado, sentían la necesidad de estar presencialmente para hacer la práctica del programa.

A partir de la flexibilidad de la plataforma de Teams y sus recursos de grabación de audio y video, se pudo desarrollar en el semestre agosto-diciembre 2020, no sin dificultad, la estrategia del modelo de acción discursiva radiofónica, que paso a ser mediática y transmедиática. Debido a que se empleó una plataforma educativa de internet, para producir radio y televisión al mismo tiempo. A través de la reorganización de los preconcebidos de los estudiantes acostumbrados a la dinámica o el *habitus* del salón presencial, se procedió a intentar cambiar por un *habitus* virtual completamente.

Fruto de la aplicación de esta estrategia de acción-educativa en el aula virtual, una de las prácticas exitosas para desarrollar en esa materia, fue un programa radiofónico que se transmitió en formato mesa redonda, en Teams y que se adaptó por parte del docente para incorporarlo como parte de un programa de FM ya existente en Radio Universidad 89.5 FM en Torreón y 104.1 F.M. en Saltillo, llamado “La *Tacita de Café*” del sistema Universitario de Radio de la Universidad Autónoma de Coahuila. Ese mismo se subió a la plataforma *Anchore*, que lo distribuye en *Spotify* y otras redes, lo cual lo convierte ahora en su versión transmедиática, como Podcast. Lo cual nos plantea nuevas formas de integrar los lenguajes de medios en las dinámicas de clase e incluso generar contenidos útiles para la cotidianidad de las audiencias.

Es un acercamiento al planteamiento pedagógico de la propia Universidad Autónoma de Coahuila (UAdeC) y su apuesta por la visión del constructivismo y del humanismo para el desarrollo armónico del estudiante y de la integración de los 4 pilares de la educación de la UNESCO presentes en el modelo educativo de la UAdeC y que busca la “construcción de mentes críticas, creativas y propositivas de los estudiantes...la interacción comunicativa” (UADEC, 2016) Esto en conjunto con los docentes y en este caso en particular con los profesionales de los medios de comunicación universitarios, en particular la radio universitaria. Esto pensando en la Sociedad del conocimiento dónde se busca la “economía del saber” (UADEC, 2016)

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El marco teórico sobre el que fundamento y sustento la unidad de análisis compleja de esta investigación, es una plática interdisciplinaria con los autores que manejan “la acción” como parte fundamental de sus investigaciones, y que nos permiten abordar algunas de las más importantes características de los actores o agentes sociales y su espacio de acción: Bourdieu y la acción social (Bourdieu, 1997); Habermas y la acción comunicativa en sus dos tomos (Habermas, 1992; Habermas, 1999) y Piaget y sus esquemas de acción (Piaget, 2000) y constructivismo de la epistemología genética (Piaget y col., 1981).

Ellos son nuestro sustento teórico, desde la Teoría de la acción social que implica: *Habitus* y Campos sociales principalmente; La Teoría de la Acción Comunicativa y su inseparable Racionalidad Comunicativa, y la teoría Cognitiva de las Equilibraciones, con la construcción del conocimiento a partir de esquemas de acción.

Para descifrar los mecanismos de la racionalidad comunicativa dentro del campo de la radiodifusión universitaria por parte de los agentes que producen y programan radio, tomaremos la ayuda de Jensen y sus planteamientos teóricos sobre la comunicación humana y los niveles de la comunicación (Jensen, 2014). Asimismo, el concepto de Krotz sobre mediatización (Krotz, 2009), pensado desde la producción y programación de la radio y sus agentes.

Pero también de cómo se da la mediación Vigotsky (1977) a partir del signo y las herramientas, en este caso de la radiodifusión, de los sujetos entre sí y para otros. Esto a partir del lenguaje radiofónico como objeto mediador entre el agente y la construcción del discurso radiofónico para la divulgación de la ciencia, por parte de un grupo que lo ostenta (Van Dijk, 1990) como acción social (Wodak & Meyer, 2003) en la acción mediata de su entorno (Scollon, 2003). El discurso es acción también y podemos analizar el discurso como plática y práctica mediata cotidiana y como productos radiofónicos, Pensando en ellos como “Competencias educativas”, y colocándolas en los espacios d1, D2, D3, etc., que se muestran en la Figura 1.

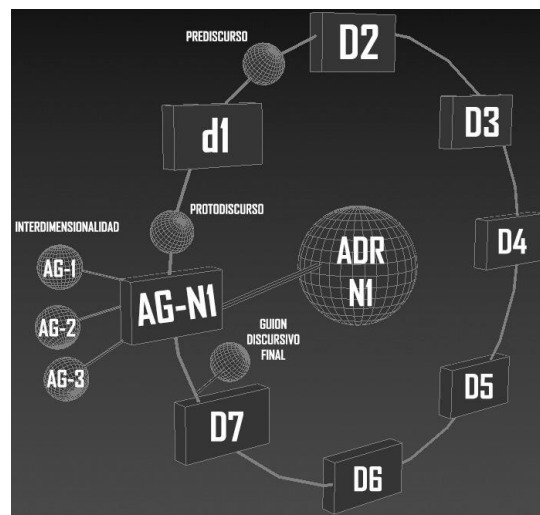


Figura 1: Acción discursiva Radiofónica. Nivel 1: Cara a Cara. Elaboración propia. Diseño 3-D: Akira Ogawa (Estudiante de Arquitectura: ITCHII, Chihuahua).

La Figura 1 la entenderemos con los preconstruidos de cada persona, que dan una Inter dimensionalidad al discurso coloquial, radiofónico, educativo, elitista, científico, etc., dependiendo de las variables o categorías de cada agente en los

diálogos dentro del grupo, incluido el docente. Esto nos da un proto discurso mental desde el sentido común, un prediscurso después del discurso 1 (d1) (preconstruido: Radiodifusión), que va construyéndose, conforme pasa de categoría en categoría, (D2, D3, DN....) hasta el guion discursivo final. Esto se da desde el agente y sus interacciones, en sus dimensiones intraobjetual, a lo interobjetual y de ahí a lo transobjetual (García, 2006).

Así entenderemos que a las prácticas cotidianas y convencionalizadas de la construcción del discurso radiofónico para la acción comunicativa radiofónica cómo: acción discursiva radiofónica, sea en texto o hablada (Figura 2). La pensamos desde los niveles de comunicación de Jensen (2014) e identificamos tres tipos inicialmente: en un primer nivel entre los agentes del campo para su entendimiento entre sí, como productores, programadores, guionistas, locutores, directivos, etc.; Y en un segundo nivel, para las audiencias desde el discurso radiofónico dialogado en el primer nivel entre los agentes del campo. La retroalimentación del público hacia los agentes es parte importante y ésta se da de forma interpersonal a través de teléfono y de redes sociales, cómo parte del preconcebido “audiencia”. Son comunicación de primer y tercer nivel (Jensen, 2014), cómo se ve en la Figura 3.

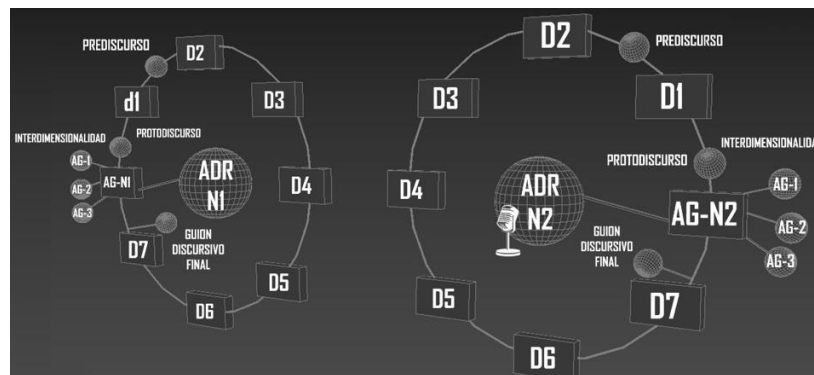


Figura 2: Acción discursiva radiofónica: Nivel 1 y 2: Cara a cara; del Programa de la emisora al Público-audiencia. Elaboración propia. Diseño 3-D: Akira Ogawa. (Estudiante de Arquitectura: ITCHII, Chihuahua).

Con esto abarcamos los procesos semióticos de producción (o construcción), circulación y difusión del discurso (Haidar, 2006). El tercer nivel, sería la comunicación a través de internet, como plataforma principal de comunicación.

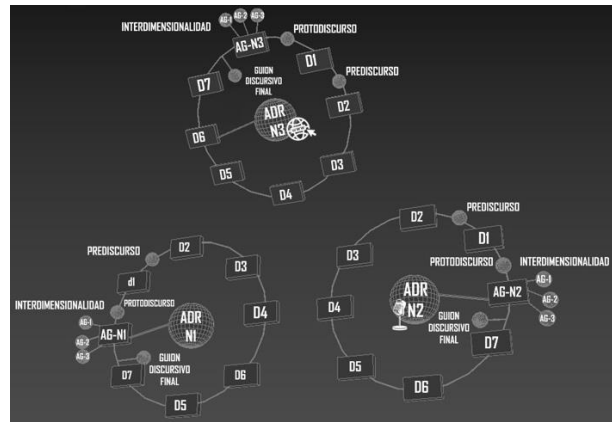


Figura 3: Acción discursiva radiofónica: Nivel 3: Internet. Elaboración propia. Diseño 3-D: Akira Ogawa. (Estudiante de Arquitectura: ITCHII, Chihuahua).

Todo esto desde las categorías de estudio surge de las dimensiones del *habitus*: Disposicional: Praxeológica/afectiva; Distributiva: posición en el campo/ Nivel que ocupa en el campo/ Relación con otros sujetos; Económica: El interés por el juego en el campo/ Desinterés en el juego/ Inversión en tiempo y conocimiento; Categorical: Valores/ ordenamiento del mundo/ Deber ser (Sánchez Dromundo, 2007) (Figura 4).

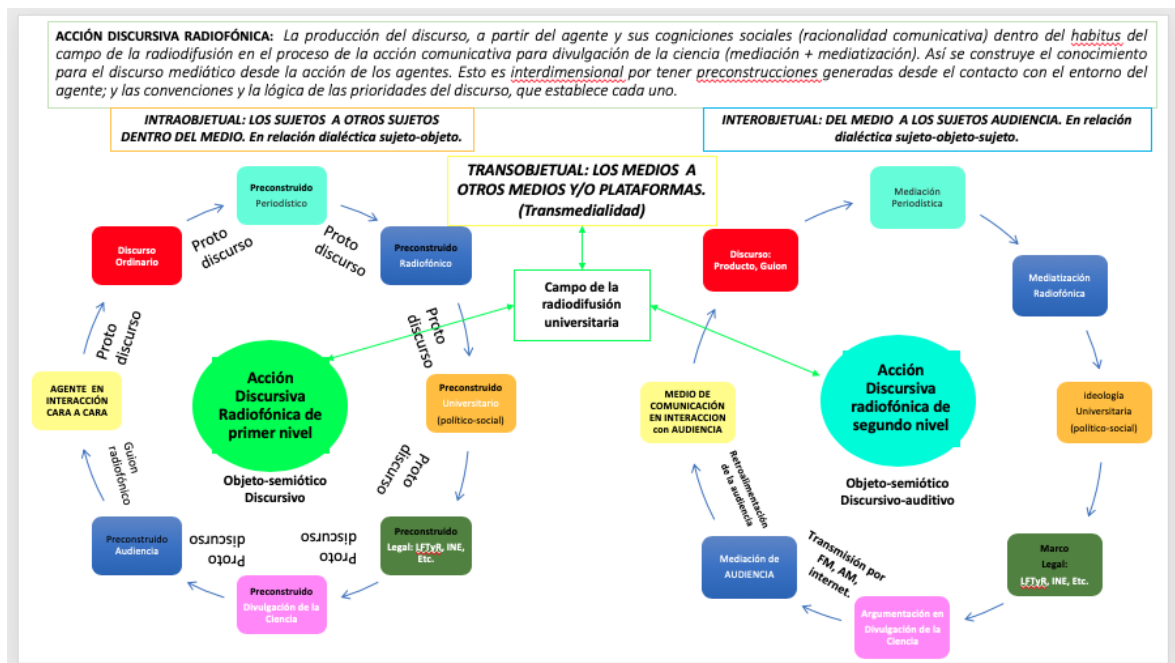


Figura 4. Acción discursiva radiofónica hacia la transmedialidad. Elaboración propia. (Estudiante de Arquitectura: ITCHII, Chihuahua).

Partiendo desde la cibercultur@ como estrategia de comunicación, información y conocimiento, nos permite entablar este dialogo entre el marco teórico y el epistemológico, del cual emerge la construcción del conocimiento, por un lado, sobre la comunicación interpersonal, mediática, entre otras; por otro el accionar de los sujetos pensado desde lo social (y cultural), lo cognitivo, y lo físico o material.

Sostenemos que la comunicación es acción social y en si misma acción comunicativa, además de discurso y prácticas estructuradas desde los dominios social (y cultural) psicológico y biológico. Entendemos en esta investigación al sujeto como un ente biopsicosocial, circunscrito y estructurado desde lo biológico, lo psicológico y lo sociológico (o socio-antropológico).

Explicando esto debemos entender que en primera instancia existen condiciones de posibilidad de acción y comunicación, las cuales identificamos desde lo biológico y fisiológicas (Piaget y col., 1981; Jensen, 2014), que permiten al sujeto sobrevivir e interactuar con otros semejantes a su situación física. En segundo plano desde lo psicológico con una serie de estructuras cognitivas o esquemas, que, como condiciones o posibilidades de comunicación a partir de la acción, le permiten al sujeto construir el conocimiento por los mecanismos de asimilación- acomodación y de des-equilibración y equilibración (Piaget y col., 1981). Así como de cierta racionalidad comunicativa, a partir del lenguaje que surge de la propia estructura cognitiva y del contacto social, desde lo simbólico (Habermas, 1999).

En un tercer plano desde lo social, como agente de un campo, con un habitus de prácticas, aseveraciones, “razones de ser”, herencias, presunciones y conocimientos adquiridos en la doxa de sentido común, a través de una trayectoria social y capitales propios de cada sujeto, que está inmerso en una sociedad bajo cierta cultura particular (Bourdieu, 1991). Este mismo actor social participa como agente del campo en que se establece dentro del espacio social, y ese mismo campo le estructura y reestructura y el agente a su vez reestructura y estructura el campo en su acción social e interacción con otros agentes. Así mismo pasa en el aula como en los medios de comunicación, recordemos que las plataformas son digitales, mediatizan y son mediados por el sujeto, a través de los discursos y preconstruidos, convertidos en acciones y viceversa.

El eje teórico es entonces *la acción del sujeto en lo biológico, psicológico, lo social y lo comunicativo*, con base a una estructura biológica, cognitiva, social y cultural, que es flexible y en constante cambio, pero al mismo tiempo estable. Que nos sirven para dar cuenta de cómo construimos el conocimiento desde los individuos, entre individuos y a partir de lo social, en nuestro contexto cotidiano. Cómo modelo llamado: acción discursiva radiofónica (Sadi & Navarro, 2019) en tres

niveles de interacción con preconcebidos y construcciones sociocognitivas (Sadi & Zapata, 2020).

METODOLOGÍA

Este artículo está escrito como parte de la implementación de un modelo experimental y, es un estudio de caso único, de tipo cualitativo. Se trabajó bajo el esquema del método de investigación-acción participativa (IAP) (Behar Rivero, Daniel, 2008; De Oliveira Figueiredo, Gustavo, 2015), tendiente al desarrollo de la reflexividad crítica a través del modelo de la acción discursiva radiofónica, y las técnicas enmarcadas en el taller desde la cibercultur@ (González, 2018) con la Población de 20 estudiantes de licenciatura. Es una investigación aplicada desde un modelo nuevo que estamos probando.

Se llevó a cabo como prueba piloto a partir de la clase regular de 2 horas de la materia, y a un mes de haber, hecho trabajos de reproducción. Por ello, a partir del modelo interdisciplinario desde la epistemología genética y la cibercultur@, de la acción discursiva radiofónica (Sadi & Zapata, 2020), se construye como resultado y una solución a un problema real, que surge de la cotidianidad particularmente de la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, de la Carrera de Comunicación, del octavo semestre, de la Universidad Autónoma de Coahuila, unidad Torreón. Los pasos metodológicos complejos fueron a partir del uso del tiempo clase, con las herramientas disponibles de cada estudiante, las cuales variaban mucho, las trayectorias sociales, capitales simbólico y culturales, de los agentes y sus competencias adquiridas a lo largo de su carrera.

El docente fungió como, facilitador, mediador-moderador, para ir resolviendo todas las problemáticas desde conectividad y uso de la plataforma Teams, hasta las dudas teóricas y técnicas del lenguaje radiofónico, que los estudiantes iban expresando. Todo el programa se planificó desde 3 semanas antes y se ejecutó a “modo de prueba”, o como un piloto, que al final de la emisión, se devolvió a los estudiantes, que “hacían radio” a través de una plataforma de internet. Pasando así los tres primeros niveles de Jensen (2014): Cuerpo y herramientas, Comunicación mediática, e internet.

El objetivo principal fue configurar un programa radiofónico en vivo, de tipo mesa redonda, a través del uso de la plataforma teams, con las técnicas del modelo. Las cuales fueron reveladas a los estudiantes al final de la clase y se les pidió autorización para convertir esa práctica en un producto para la divulgación y comunicación de la ciencia en radio universidad y como podcast, en spotify. Sobre

una temática cotidiana y científica a la vez, la pandemia de Covid 19 y los estragos que produce en los individuos, desde su personal experiencia cotidiana.

Los objetivos específicos: A nuestro acercamiento al campo estudiantil con un modelo propio e interdisciplinar. B.-Identificar la producción radiofónica como construcción de conocimiento para la divulgación de la ciencia a partir del lenguaje radiofonico y las características propias del contexto y el entorno regional. C.- Desarrollar un producto de divulgación de la ciencia en búsqueda del empoderamiento ciudadano. D.-Con base a la cultura radiofónica, desarrollar contenidos desde la cultura de la ciencia y la interacción con las audiencias de las radiodifusoras locales y regionales de la UAdeC y por el podcast. Primero en proyecto, luego en guión, después como audio.

Esto es un proceso de interacciones comunicativas en construcción, en un nuevo habitus del campo de la divulgación de la ciencia en la U A de C, pensando desde el campo de la producción radiofónica educativa (Kaplún, 1994) la radiodifusión universitaria, el campo de la academia y la comunicación educativa.

RESULTADOS

En primera parte, se consideró el cambio de actitudes de los participantes respecto a la radiodifusión y su producción, llevando los conceptos que leen en sus textos de referencia sobre producción de radio y con la experiencia vivida de un tema que todos conocían y estaban inmersos: La pandemia de Covid-19 y cómo afecta a los estudiantes y a todas las personas en general.

Esto fue realizado desde sus preconstruidos y trayectoria social, desde su agencia como estudiantes universitarios, jóvenes en promedio de 20 años, comunicólogos, nivel socioeconómico medio, medio bajo, y con experiencias disímiles de movilidad, experiencia y consumo de medios de comunicación, entre otras variables que forman parte de su habitus personal, y del espacio social en el que se desarrollan. También desde su racionalidad comunicativa propia. Con esto cubrimos la parte de conocimientos interdisciplinarios, mediatización, mediación y acción discursiva radiofónica en forma de proyectos, guiones, propuestas de nombre de campaña de capsulas informativas, reportajes, entrevistas y algunos otros formatos que permitirían de una manera ágil y rápida el producir radio y construir conocimiento de divulgación científica a nivel de las audiencias generales, con miras a la apropiación cultural en su cotidianidad. Desidiendo el uso de la mesa redonda para poder interactuar todos, al considerarlo más justo y entretenido.

A partir de aquí, del trabajo interdisciplinario, la plática y acercamiento de los agentes de este futuro campo de producción de divulgación de la ciencia en radiodifusión con un *habitus* en construcción, se conformó esta producción radiofónica en tres niveles de comunicación, (cara a cara, mediática e internet) con mujeres, hombres y miembros LGBTTI, dispuestos a construir conocimiento con base al lenguaje de la ciencia, el lenguaje radiofónico y el lenguaje de la doxa del sentido común (Bourdieu,1991).

DELIBERACIONES

Por tanto, se confrontó el *habitus* concepto caracterizado por Bourdieu,(1997) de los profesionales del medio, con el de las enseñanzas de los docentes y los aprendizajes y asimilaciones de los alumnos dentro del aula y al enfrentarse a una nueva forma de entender el “cómo hacer la radio” y “¿quién hace la divulgación de la ciencia?, y porque es tan importante que un equipo de trabajo sea plural e incluyente, utilizando sus conocimientos previos, sus capitales (simbólicos, culturales, etc.) y sus diversas trayectorias sociales.

El conocimiento científico se dibuja ahora como un nuevo reto que va más allá de hacer la nota periodística de las famosas “6 w” en inglés, que cubre la información de ¿qué, quién, cómo, cuándo, dónde y por qué?, por una dinámica que va más allá de una simple sociología de producción de mensajes, y nos pone en un *habitus* de producción radiofónica que involucra un espacio social más amplio y campos múltiples de interacción entre sujetos y no sólo entre palabras, sino como competencias incorporadas en la equilibración y re-equilibración del conocimiento en construcción a partir de la acción conjunta como discurso y como trabajo grupal.

El proceso de entender como es la radio y su lenguaje, como es la ciencia y su lenguaje, y como es el periodismo y su lenguaje, como es la universidad y sus sistemas de interacciones permite, al que llevó el curso, entender su papel de agente de cambio social dentro del campo, del sistema y su indiscutible fuerza como reestructurador de las acciones y costumbres de producción, reproducción, circulación de los mensajes en sus tres etapas: preproducción, producción y postproducción, hasta que llega a las audiencias, que las adaptaran a su cotidianidad.

La clase se volvió de una materia más sobre edición, a un ejercicio interesante y que podía marcar una diferencia. Se creo un producto auditivo que llegó a la sociedad desde el aula virtual, por FM e internet, a nivel local, regional y hasta dónde se escuche por internet. Eso motivo a los estudiantes a construir

programas en lugar de sólo pensar en “producir” como un objeto comercial de maquila de audio.

Podemos gracias a este modelo pasarlo posteriormente como un modelo educativo que funcione en cualquier plataforma con su lenguaje y estructura característica tanto para lo “radiofónico” como lo “televisivo”, “prensa”, “internet”, “redes sociales”, “audiovisuales”, etc. Entonces podríamos hablar- con sus debidos ajustes- de una acción discursiva mediática o multimediática o transmediática, pensando en los diferentes niveles o etapas de desarrollo del mensaje de las materias y los agentes involucrados.

El programa salió al aire por FM el 9 de octubre de 2020, en el programa la tacita de café: “Estudiantes en tiempos de Covid, educación a distancia en Torreón por XHUCT 89.5fm y en Saltillo por XHUACS 104.1 fm. En spotify apareció en “La tacita de café: 02 10 2020: Estudiantes en tiempos de Covid, educación a distancia” subido desde el día siete de noviembre

La discusión será a futuro, sobre los alcances y el impacto de los productos radiofónicos y de las rutinas de trabajo interdisciplinario a modo de hábitos de la radiodifusión para las materias que enseñan a hacer radio, podcast e incluso audiovisuales, para utilizar esto como parte de las estrategias y dinámicas de clase. Debido al entusiasmo percibido en los estudiantes, al saber que lo que construyen en el papel y graban en el “estudio” llega a la audiencia realmente y no sólo es una calificación más.

Esto a partir de la construcción de la acción discursiva radiofónica, con la que se desarrolla acción comunicativa mediada y mediatizada para construir conocimiento y difundirlo o divulgarlo en forma de discursos semióticos con una racionalidad comunicativa, para una audiencia heterogénea, es decir, se construye una “**radio cultura**”, a partir de la acción discursiva radiofónica. En este caso en y desde el aula, para las audiencias.

CONCLUSIONES

Es posible repetir este modelo teórico metodológico, que a partir de la cibercultura@ y nacido desde la epistemología genética, puede contribuir al reordenamiento de las acciones positivas, hacia un campo social de acción, donde los agentes, puedan incidir tanto en el hábito de su campo particular, como en el sistema donde se inserta y a su vez en el espacio social.

Cambiando la racionalidad comunicativa, la forma de mediatizar, el sistema mediatizante de los implicados en producir radiodifusión, y abrir las puertas para

generar productos a su vez transmediáticos, desde inicio y no sólo como casualidad o anexo.

Es interesante ver como la radio renace gracias al podcast, puesto que la plataforma juvenil son las redes sociales digitales y la radio análoga la de los adultos. Pero al final de cuentas el medio no es el mensaje, sino sólo condiciona su adaptación a las condiciones de reproductibilidad del mismo. La mediación del agente, la mediatización del agente del medio y la recepción del propio agente, es lo que podemos de momento redireccionar. Pero las de las audiencias, son sumamente complejas y quedan fuera de este estudio de momento.

Las acciones sociales, son las que cambian y hacen que las estructuras del medio cambien, así como las de los agentes. Recuerden, en este caso práctico estuvimos trabajando el primer nivel de comunicación que se da entre los agentes cara a cara en virtual, y el segundo, de los agentes dentro del medio a los externos por acción mediática (ondas hertzianas), y después al tercero que es a partir de internet, al final una plataforma que añade una capa extra de lenguaje a la interdimensionalidad del problema objeto de estudio: la acción comunicativa humana en grupos para estructurar conocimiento en forma de discursos mediados y mediatizados para la divulgación de la ciencia desde la radio. Esperamos que las aplicaciones de esta investigación puedan ser replicadas por otros, una vez que exponamos la metodología más claramente y a profundidad. Puesto que las audiencias en la construcción del mensaje son las ausentes y sólo se les integra por el diálogo a modo de precogniciones e intuiciones de los mediadores, es decir, el trílogo de los agentes y el campo de la radiodifusión, su imaginación, su cognición y acciones. El cómo analizan o diseñan las estrategias mentales para ese preconcebido que llaman audiencias.

REFERENCIAS

Almaguer Kalixto, P. E. (2013). *Cibercultur@ e Investigación-Acción Participativa: intersecciones metodológicas para el desarrollo de comunidades emergentes del conocimiento Local*. *Revista Estudios sobre las culturas contemporáneas*, XIX (37): 129-164.

Behar Rivero, D. S. (2008). *Metodología de la Investigación*. Buenos Aires, Argentina: Shalom.

Bourdieu, P. (1991). Doxa y vida ordinaria. *Talking Ideas («Ideas Habladas»)*, 219-231. (Traductor, T. Eagleton,), [En línea] Newleftreview.es. Disponible en: <https://bit.ly/3cdLh0V>

Bourdieu, P. (1997). *Razones Prácticas, sobre la teoría de la acción*. España: Anagrama.

Consejo Mexicano de Ciencias Sociales (COMECOSO, 2019), Recurso didáctico: Sadi, J. en Competencias Radiofónicas: La divulgación de la ciencia en la Radio. [En línea] Repositorio 2019: <https://bit.ly/3fbLzHz>

De Oliveira Figueiredo, G. (2015). Investigación Acción Participativa: una alternativa para la epistemología social en Latinoamérica. *Redalyc*, 39(86): 271-290. <http://bit.ly/2PmrLWL>

DIP. Dirección de Investigación y postgrado de la Universidad Autónoma de Coahuila (2020, 10, febrero) [En línea] Disponible en: <http://bit.ly/2PIEM2N>

Documento, 911(2020): Comunicación: Estadística de Educación Superior por Carrera 911 (2015-2020). Estadísticas de Comunicación por cohorte. Documentos físicos de la Secretaría Académica. Torreón.

García, R. (2006). *Sistemas Complejos, Conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*. España: Gedisa.

González, A. (2018). Aprendizajes en los frentes culturales y el desarrollo de cibercultura. En A. J. González, *¡No está muerto quién pelea! Homenaje a la Obra de Rolando V. García Boutige* (págs. 281-310) UNAM. México.

Grigori, W. (1999) En busca de una nueva noología. *Estudios Pedagógicos*, núm. 25. pp. 71-82. Valdivia. Chile. <https://bit.ly/3sfgakd>

Habermas, Jürgen. (1992). *Teoría de la acción comunicativa II, Crítica de la razón funcionalista*. Taurus Humanidades. México.

Habermas, J. (1999). *Teoría de la acción comunicativa I. Racionalidad de la acción y racionalización social*. Taurus Humanidades. México.

Haidar, J. (2006). *Debate CEU-Rectoría Torbellino pasional de los Argumentos. (Vol. Colección Postgrado)*. UNAM. México.

Jensen, K. B. (2014). *La comunicación y los Medios, Metodologías de investigación cualitativa y cuantitativa*. (M. Sánchez-Ventura, Trad.) Fondo de Cultura Económica. México.

Kaplún, M. (1994). *Producción de programas de radio*. Ed. Crenecca. México.

Krotz, F. (2009). Mediatization: A Concept with Which to Grasp Media and Social Change. En L. Kunt, & S. Livingstone, Mediatization, concepts, changes, consequences. Peter lang.

Maáss, M., Azmorrutia, J., Almaguer, P., Gonzalez, L., & Manuel, M. (2012). Sociocibernética, Cibercultur@ y Sociedad, CEIICH-UNAM. México

Negrete Yanquelevich, A. (2012). *La divulgación de la ciencia a través de formas narrativas..* CEIICH-UNAM. México.

Piaget, J. (1998). *La equilibración de las estructuras cognitivas. Problema central del desarrollo* (Quinta Edición ed.). Siglo XXI Editores. México.

Piaget, J., Inhelder, B., García, R., & Vonèche, J. (1981). *Epistemología genética y equilibración*. Editorial Fundamentos. España.

Sadi Durón, J. & Zapata Salazar, J. (2020). La radiodifusión universitaria: acción discursiva radiofónica para la divulgación de la ciencia. *Ambitos Revista Internacional de Comunicación*, 47: 87-108. DOI: <https://doi.org/10.12795/Ambitos.2020.i47.05>

Sadi Durón, J. & Navarro Zamora, L. (2019). Divulgación de la ciencia en la radiodifusión universitaria: acción discursiva radiofónica. En Navarro Zamora, Lizy. *La comunicación de la Ciencia. Miradas interdisciplinarias con responsabilidad social* (págs. 207-230). Ed. Colofón. México.

Sadi, J. (2020) Edición de Audio desde Cero. [Vídeo]. YouTube. <https://bit.ly/3vPCYQp>

Sadi, J. (2020): 02 10 2020 Estudiantes en tiempos de Covid, educación a distancia.[Episodio de Podcast]: En La Tacita de Café. Radio Universidad 89.5fm Torreón y 104.1fm Saltillo, Sistema Universitario de Radio, de la Universidad Autónoma de Coahuila, México.: <http://spoti.fi/3vT51ib>

Sadi, J. (2020). Serie, Sororizate: empoderamiento auditivo, 8 de marzo 2019-2020.[Episodio de Podcast]: En La Tacita de Café. Radio Universidad 89.5fm Torreón y 104.1fm Saltillo, Sistema Universitario de Radio, de la Universidad Autónoma de Coahuila, México. <http://spoti.fi/3rd2V8Y>

Sánchez Dromudo, R. Á. (2007). La teoría de los campos de Bourdieu, como esquema teórico de análisis del proceso de graduación en posgrado. 9(1), 2007. 21

de MARZO de Ensenada, Baja California, UABC. México. [En línea]Versión digital.
Disponible en: <http://bit.ly/2pCW9A0>

Scollon, R. (2003). Acción y texto: para una comprensión conjunta del lugar del texto en la inter(acción) social, el análisis mediato del discurso y la acción social. En R. & Wodak, *Métodos de Análisis Crítico del Discurso*. (pp. 205-266). España: Gedisa.

SIE. (2020) Portal de Estadística. Dirección de planeación Universidad Autónoma de Coahuila: infografía [En línea] Disponible: <http://bit.ly/3vP46z6>

UADEC. Universidad Autónoma de Coahuila (2016). Modelo Educativo Extenso. Comunicación Institucional. Saltillo. Archivo digital [En línea]. Disponible: <http://bit.ly/2PYS1oJ>

Van Dijk, T. A. (1990). *La noticia como discurso, Comprensión, estructura y producción de la información*. (Primera Edición ed.). Paidós comunicación, España.

Vázquez Guerrero, M., & Parejo Cuellar, M. (2015). La divulgación científica a través de la radio universitaria en España y México. *Revista Razón y Palabra*, 91: 669-686.

Vigotsky, L. (1977). *Pensamiento y lenguaje. Teoría del desarrollo cultural de las funciones psíquicas*. (M. M. Rotger, Trad.) Pléyade. España.

Wodak, R., & Meyer, M. (2003). *Metodos de Análisis Crítico del Discurso*. (Primera ed.).Ed. Gedisa. España.