

Cuencas y sistemas arrecifales del Golfo de México en el estado de Veracruz: Contaminación por hidrocarburos y biorremediación

Leticia Narciso-Ortiz¹, Karen A. Vargas-García², Ana L. Vázquez-Larios², Tannia A. Quiñones-Muñoz³, Ricardo Hernández-Martínez⁴, Manuel A. Lizardi-Jiménez^{5*}

¹Tecnológico Nacional de México Veracruz / Tierra Blanca, C.P. 91897.

²Instituto Tecnológico Superior de Tierra Blanca, C.P. 95180.

³CONACYT- Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C., C.P. 42162.

⁴CONACYT- Colegio de Postgraduados Campus Córdoba, C.P. 94946.

⁵CONACYT-Universidad Autónoma de San Luis Potosí, C.P. 78210.

chamarripas@yahoo.com.mx

Resumen

Las cuencas y los arrecifes son ecosistemas importantes en el mundo ya que proveen diferentes servicios. La contaminación por hidrocarburos está amenazando estos ecosistemas. Veracruz, tiene condiciones que lo hacen propenso a este tipo de contaminación. Es importante entonces, proponer estrategias de remediación, la remediación por medio de microorganismos es principalmente utilizada para tratar contaminación por hidrocarburos. El objetivo de esta investigación fue evaluar la contaminación por hidrocarburos en cuencas y arrecifes del Golfo de México en Veracruz y diseñar biorreactores para cada tipo de contaminación. Se encontró contaminación por hidrocarburos octano y nonano en de abril 2018, e hidrocarburos de cadena más larga y aromáticos en julio 2018, en concentraciones que incluso exceden el límite permitido de descarga de aguas congénitas. El consorcio microbiano compuesto por *Acinetobacter bouvetii*, *Defluviobacter lusatiensis*, *Xanthomonas sp* y *Shewanella sp* fue cultivado en biorreactores airlift con gasolina y diésel como fuente de carbono (20 gL⁻¹) en medios salino y mineral. En 14 días de cultivo, fue degradado 91.39 ± 1.32% de diésel en medio salino y 97.55 ± 0.74% en medio mineral. La gasolina fue degradada en 95.05 ± 4.75 % en medio salino y 98.79 ± 1.19% en medio mineral en el mismo tiempo. Todos los experimentos mostraron incremento de unidades de actividad emulsificante y disminución de diámetro de las gotas del hidrocarburo a lo largo del tiempo de cultivo. Es importante mencionar que parte de los resultados aquí presentados han sido publicados en revistas científicas, carteles y ponencias de diferentes congresos.

Palabras clave: Arrecifes, Cuencas, Contaminación por hidrocarburos, Biorremediación de hidrocarburos, Consorcio hidrocarbonoclasta.

Abstract

Coral reefs and watersheds are important ecosystems, due to provide many services. Hydrocarbon pollution threatens these ecosystems. Many sources of hydrocarbon pollution are in Veracruz Mexico. It is important to propose remediation strategies. Microbial remediation is mainly used to treat hydrocarbons pollution. The aim of this study was to evaluate hydrocarbon pollution in reefs and watersheds in the Gulf of Mexico along the coast of Veracruz and to design bioreactors for each kind of hydrocarbon pollution. We found hydrocarbon contamination, octane and nonane in April 2018; and longer-chain and aromatic hydrocarbons in July 2018. Hydrocarbons concentration in water bodies, even exceeded the limit for discharge of produced waters of the oil industry. A microbial consortium composed of *Acinetobacter bouvetii*, *Defluviobacter lusatiensis* (before *Aquamicrobium lusatiense*), *Xanthomonas* and *Shewanella* was cultivated in an airlift bioreactor with 20 gL⁻¹ gasoline

and diesel as only carbon source in sea water medium and mineral medium. The results show that $91.39 \pm 1.32\%$ of diesel was absorbed in a sea water medium and $97.55 \pm 0.74\%$ in a mineral medium in 14 days. Furthermore, $95.05 \pm 4.75\%$ of gasoline was degraded in a sea water medium and $98.79 \pm 1.19\%$ in a mineral medium over the same time period. All of the experiments, the consortium showed that emulsifier activity increased, and the diameter of hydrocarbon droplets decreased with time. It is important to mention that part of the results presented here have been published in scientific magazines, posters, and papers from different congresses.

Key words: Coral reefs, Watersheds, Hydrocarbon pollution, Hydrocarbon bioremediation, Hydrocarbonoclastic consortium.

Introducción

Nota: Parte de los resultados de este artículo han sido publicados en revistas científicas (García-Cruz et al., 2019; Narciso-Ortiz et al., 2020a; Narciso-Ortiz et al., 2020b), ponencias y carteles de congresos.

El Golfo de México es una cuenca marina donde drenan importantes sistemas fluviales y cuencas (INEGI, 2015). El Estado de Veracruz tiene 8 cuencas hidrográficas que desembocan en el Golfo de México (CONAGUA, 2018), y alberga al Parque Nacional del Sistema Arrecifal Veracruzano (PNSAV) (Salas-Pérez y Granados-Barba, 2008), declarado Área Marina Protegida desde 1992, Sitio Ramsar (Humedales de Importancia Internacional) en 2004 e integrado a la Red Mundial de Reservas de Biosfera de la UNESCO desde 2006 (Ortiz-Lozano et al., 2018).

Las cuencas y los arrecifes son ecosistemas altamente productivos en el mundo. Los arrecifes proveen servicios a través de la pesca, el turismo, y la protección costera (Lamb et al., 2018); tienen una variedad de mecanismos para ciclar energía y nutrientes y forman la base de la cadena alimenticia (Haas et al., 2016). Las cuencas por su parte albergan diversas formas de vida, proporcionan agua doméstica, agrícola e industrial y sustentan la producción de alimentos basados en pesca y acuicultura (Arthington et al., 2010).

Los hidrocarburos tienen efectos tóxicos cuando son liberados en los ecosistemas acuáticos. Cuando entran en contacto con el agua, se propagan y forman una capa delgada en la superficie, evitando el correcto intercambio de gases entre el aire y el agua, bloqueando el paso de la luz solar, lo que impide la respiración y el proceso de

fotosíntesis; impactando principalmente al fitoplancton y zooplancton, lo que causa una afectación en la cadena alimenticia (Silva et al., 2014; Liu et al., 2016).

Dos casos de importancia referentes a contaminación de hidrocarburos en el Golfo de México se presentaron en: Junio de 1979, la explosión del pozo de exploración Ixtoc-I de Petróleos Mexicanos (PEMEX) en la bahía de Campeche derramando aproximadamente 475,000 ton³ de petróleo (Sun et al., 2015) y en Abril del 2010, la explosión en la plataforma de perforación *Deepwater Horizon* a 66 km al suroeste de la costa de Louisiana, derramándose un aproximado de 500,000 m³ de petróleo (Beyer et al., 2016). Las consecuencias ecológicas en el Golfo de México derivadas de estos acontecimientos han sido severas, afectando ecosistemas como las cuencas y los arrecifes (García-Cruz y Aguirre-Macedo, 2014).

En el estado de Veracruz se ha incrementado la contaminación debida en gran parte a la actividad de la industria petroquímica de la región de Coatzacoalcos (García-Cruz et al., 2018). En el año 2004 aconteció un derrame de petróleo crudo en el municipio de Nanchital, hasta la desembocadura del Río Coatzacoalcos, dejando perturbaciones significativas en el ecosistema de la cuenca (Albert et al., 2005). Existen otros factores en el estado de Veracruz que podrían contribuir a la contaminación por hidrocarburos, por ejemplo, las actividades portuarias (Froehner et al., 2018), incluyendo las obras de ampliación del Puerto de Veracruz (SEMARNAT, 2018) que en parte se están llevando a cabo en una zona que antes pertenecía al Arrecife Punta Gorda (Ortiz-Lozano et al., 2018); los derrames en mar abierto como el ocurrido en Septiembre del 2016 frente a costas del Puerto de Veracruz al incendiarse el buque Burgos que transportaba 81 mil barriles de diésel y 23 mil de gasolina

aproximadamente (PROFEPA, 2016), los transportes marítimos pesados o de pesca (García-Cruz *et al.*, 2018) por medio de las aguas de sentina arrojadas al mar deliberadamente. La contaminación en el Golfo de México es una realidad y también los factores que podrían propiciarla en la zona del estado de Veracruz, una opción para contrarrestar estos contaminantes es la biorremediación.

La biorremediación es un proceso tecnológico que utiliza microorganismos para eliminar o reducir contaminantes (Adams *et al.*, 2015). Los biorreactores son una técnica de biorremediación *ex situ*, los cuales son contenedores en donde los contaminantes son reducidos o removidos por una serie de reacciones biológicas producidas por microorganismos (Chibueze-Azubiike *et al.*, 2016). El grupo de microorganismos que son capaces de utilizar hidrocarburos como fuente de carbono y energía. reciben el nombre de hidrocarbonoclastas (García-Cruz y Aguirre-Macedo, 2014). Las bacterias hidrocarbonoclastas se reportan como el organismo de degradación más activo y se ha demostrado que los consorcios bacterianos presentan mayor porcentaje de degradación que los cultivos individuales (Varjani, 2017). En general se han sugerido dos estrategias biológicas del contacto entre las bacterias y los hidrocarburos: mecanismos de adhesión y emulsificación del hidrocarburo (Ron y Rosenberg, 2014).

En general, la contaminación en el estado de Veracruz está documentada pero no existen estudios sobre contaminación en cuencas y sistemas arrecifales del Golfo de México en el estado de Veracruz por hidrocarburos y la información acerca de alternativas de remediación en esta zona es escasa.

El objetivo general de la presente investigación fue evaluar la contaminación por hidrocarburos en cuencas y arrecifes del Golfo de México y diseñar un biorreactor *ex profeso* para cada tipo de contaminación. Específicamente, evaluar la contaminación por hidrocarburos en 4 puntos de las cuencas hidrográficas del Río Jamapa y Río Papaloapan y 4 puntos del Sistema Arrecifal Veracruzano, Sacrificios, De en medio, Gallega y Punta Gorda; y diseñar un biorreactor *ex profeso* para la degradación de hidrocarburos

por cada condición de contaminación, por medio de un consorcio microbiano hidrocarbonoclasta.

Materiales y métodos

La estrategia experimental se llevó a cabo en 2 etapas y en cada una de ella se llevaron a cabo las siguientes actividades (Figura 1):

Etapa 1. Diagnóstico de contaminación en las cuencas y sistemas arrecifales del Golfo de México en el Estado de Veracruz:

- a. Selección de los puntos de muestreo
- b. Recolección de muestras (NMX-AA-014-1980; PROY-NMX-AA-121/1-SCFI-2008)
- c. Análisis de las muestras recolectadas por cromatografía de gases (Valdivia-Rivera *et al.*, 2018)

Etapa 2. Diseño de biorreactores *ex profeso* para la degradación de hidrocarburos por cada condición de contaminación

- a. Selección del sistema biológico
- b. Diseño del medio de cultivo
- c. Selección del tipo de biorreactor
- d. Cinéticas de degradación
 - i. Sólidos suspendidos (Denis *et al.*, 2016)
 - ii. Hidrocarburo residual (Lizardi-Jiménez *et al.*, 2012)
 - iii. Actividad emulsificante (Amaral *et al.*, 2006)
 - iv. Diámetro de gota de hidrocarburo (García-Cruz *et al.*, 2019)
 - v. Modelamiento matemático por Gompertz (Zwietering, 1990)

Resultados y discusión

Selección de los puntos de muestreo

En las tablas 1 y 2 se muestran todos los puntos de cuencas y arrecifes seleccionados para su muestreo:

Artículos

Tabla 1. Puntos de muestreo de Sistemas Arrecifales.

#	Nombre geográfico	Municipio	Latitud (N)	Longitud (O)	Justificación
1	Arrecife Sacrificios	Veracruz, Veracruz (frente a)	19°10'38.233"	96°5'32.507"	Cercanía al derrame de gasolinas y diésel provenientes del buque Burgos (PROFEPA, 2016). Se llevan a cabo recorridos turísticos al arrecife, en lanchas; el uso de las lanchas motorizadas puede generar contaminación por hidrocarburos (Davenport y Davenport, 2006). Recibe las descargas de los ríos: La Antigua, Jamapa y Papaloapan (Salas-Pérez y Granados-Barba, 2008).
2	Arrecife de Enmedio	Alvarado, Veracruz (frente a)	19°6'24.090"	95°56'17.574"	Recibe las descargas de los ríos: La Antigua, Jamapa y Papaloapan (Salas-Pérez y Granados-Barba, 2008). Clasificada como subzona de uso público de destino de recorridos turísticos en embarcaciones motorizadas (DOF, 2017).
3	Arrecife Gallega	Veracruz, Veracruz (frente a)	19°13'19.235"	96° 7' 37.558"	Cercanía al derrame de gasolinas y diésel provenientes del buque Burgos (PROFEPA, 2016). Recibe el desagüe de los sistemas de ríos más grandes y del puerto de Veracruz (Jordán-Dahlgreen y Rodríguez-Martínez, 2003).
4	Arrecife Punta Gorda	Veracruz, Veracruz (frente a)	19°14'41.970"	96°10'32.942"	La autorización del proyecto denominado "Ampliación del Puerto de Veracruz en la Zona Norte" (SEMARNAT, 2013). dicha ampliación se llevará a cabo cerca del área arrecifal (Ortiz-Lozano <i>et al.</i> , 2018). Debido a los trabajos de expansión portuaria en 2012 se desincorporó parte de este arrecife del PNSAV (DOF, 2012).

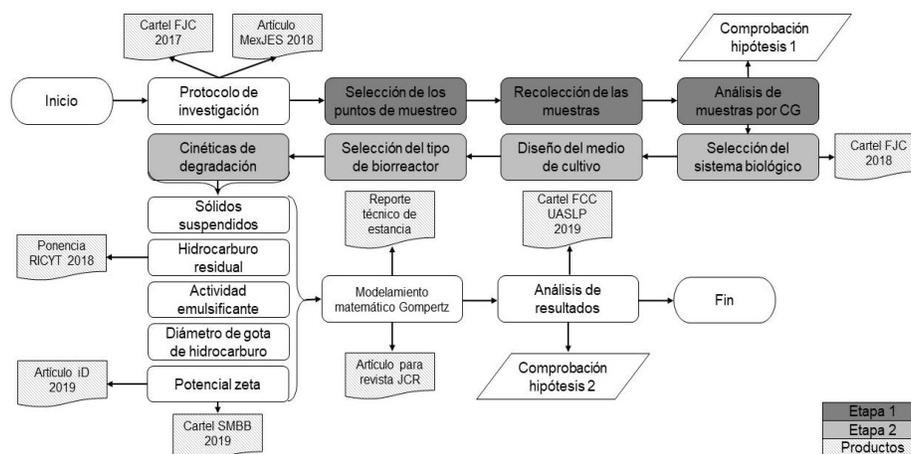


Figura 1. Diagrama de la estrategia experimental.

Tabla 2. Puntos de muestreo de Cuenca.

#	Región hidrológica	Cuenca hidrográfica	Subcuenca	Municipio	Latitud (N)	Longitud (O)
5	Papaloapan	Río Jamapa y otros	Río Jamapa	Boca del Río, Veracruz	19°05'39.0"	96°08'04.3"
6	Papaloapan	Río Jamapa y otros	Río La Antigua	La Antigua, Veracruz	19°19'08.4"	96°19'23.2"
7	Papaloapan	Río Jamapa y otros	Río Actopan-Barra de Chachalacas	Úrsulo Galván, Veracruz	19°25'02.3"	96°19'17.7"
8	Papaloapan	Río Papaloapan	Río Papaloapan	Tlacotalpan, Veracruz	18°36'47.2"	95°39'7.64"

Justificación

El río Jamapa descarga aproximadamente 2055 hm³ año⁻¹, el río La Antigua 2145 hm³ año⁻¹ y el río Papaloapan 42887 hm³ año⁻¹ (CONAGUA, 2016) directamente en el Sistema Arrecifal Veracruzano (Salas-Pérez y Granados-Barba, 2008; INEGI, 2010).

En La Antigua el transporte por medio de lancha se usa con fines turísticos y de movilidad de la población (Román-Jiménez *et al*, 2011). En algunos estudios (Monroy-Dosta *et al.*, 2015) se ha detectado la presencia de bacterias del género *Pseudomonas* en el río Actopan lo que podría indicar contaminación.

El río Actopan desemboca en el Golfo de México por medio de la Barra de Chachalacas (INEGI, 2010), pudiendo arrastrar los contaminantes al océano.

Diagnóstico de la contaminación por hidrocarburos

La tabla 3 muestra los hidrocarburos encontrados en las muestras de los periodos abril y julio 2018, la concentración y el error estándar obtenido entre las repeticiones; es importante mencionar que los resultados mostrados solo contienen los hidrocarburos de los estándares, todas las muestras analizadas, tienen más picos detectados en los cromatogramas.

En todas las muestras de monitoreo del mes de abril se tuvo presencia de nonano y en 4 puntos de los 9 muestreados, también hubo presencia de octano. Después de una revisión bibliográfica, se realizó un análisis de una muestra de gasolina magna (PEMEX, 2015), en el cual se pudo identificar presencia de octano y nonano. De acuerdo a los resultados obtenidos es probable que los contaminantes de las muestras con presencia de octano y nonano sean derivados de gasolina.

En el muestreo realizado durante julio fueron identificados hidrocarburos de cadenas de entre 16 y 40 carbonos y fenantreno, además de octano y nonano, las concentraciones sobrepasan incluso el límite de concentración máxima de hidrocarburos de agua congénita antes de la descarga (15 ppm para descarga en agua dulce y 40 ppm para

descarga en zonas marinas) (NOM-143-SEMARNAT-2003). El arrecife Gallega y Punta Gorda presentaron más hidrocarburos y en mayor concentración en el segundo muestreo, siendo ambos puntos del PNSAV los más próximos a la actual construcción de la nueva zona del Puerto de Veracruz. Se analizó también una muestra de diésel (PEMEX, 2018) y una muestra de asfalto. Derivado del análisis y la revisión bibliográfica es probable que las otras fuentes de contaminación sean diésel y asfalto. El diésel podría provenir de las aguas de sentina de los transportes marítimos. Los hidrocarburos indicadores de presencia de asfalto fueron detectados, durante temporada de lluvias y turística (INEGI, 2017), lo que podría explicar, a mayor turismo, mayor tránsito por las carpetas asfálticas y la lluvia, podría estar arrastrando los contaminantes (León- Borges y Lizardi-Jiménez, 2017). En resumen, los 3 posibles contaminantes podrían ser: gasolina, diésel y asfalto, haciendo necesaria la propuesta de técnicas de biorremediación.

Selección del sistema biológico

En la tabla 4 se muestran los consorcios disponibles y los criterios de selección, los puntos en las casillas representan los criterios con los que cuenta el consorcio correspondiente.

Artículos

Tabla 3. Hidrocarburos identificados en muestras de monitoreo de cuencas y arrecifes en abril y julio 2018.

Arrecife o Cuenca	Abril 2018		Julio 2018	
	Hidrocarburo	$\mu\text{g mL}^{-1}$ (ppm)	Hidrocarburo	$\mu\text{g mL}^{-1}$ (ppm)
Arrecife Sacrificios	Octano	0.766 ± 0.127	Nonano	0.137 ± 0.002
	Nonano	2.866 ± 0.523		
SUMA		3.632 ± 0.65		0.137 ± 0.002
Arrecife de Enmedio	Octano	0.931 ± 0.186	Nonano	0.115 ± 0.006
	Nonano	2.37 ± 0.262		
SUMA		3.301 ± 0.448		0.115 ± 0.006
Arrecife Gallega	Nonano	3.567 ± 0.436	Fenantreno	0.078 ± 0.025
			Eicosano	0.041 ± 0.007
			Dotriacontano	67.914 ± 6.053
			Hexatriacontano	66.436 ± 21.562
SUMA		3.567 ± 0.436		134.469 ± 27.646
Arrecife Punta Gorda	Nonano	2.967 ± 0.302	Octano	0.028 ± 0.005
			Triacantano	0.038 ± 0.007
			Tetracontano	134.597 ± 9.578
SUMA		2.967 ± 0.302		134.663 ± 9.590
Río Jamapa	Nonano	2.328 ± 0.112	Nonano	0.037 ± 0.002
Río La Antigua	Nonano	2.033 ± 0.622	ND	--
Río Actopan-Barra de Chachalacas	Octano	1.882 ± 0.517	Hexadecano	0.035 ± 0.003
	Nonano	1.873 ± 0.244	Fenantreno	0.185 ± 0.019
			Dotriacontano	51.765 ± 13.811
			Tetracontano	18.511 ± 1.779
			Hexatriacontano	78.017 ± 9.787
			Octatriacontano	123.775 ± 31.709
			Tetracontano	155.032 ± 25.685
SUMA		3.755 ± 0.761		427.320 ± 82.794
Barra de Chachalacas zona mar	Octano	1.338 ± 0.233	Hexatriacontano	90.825 ± 17.653
	Nonano	2.308 ± 0.414	Tetracontano	183.752 ± 44.010
SUMA		3.646 ± 0.647		274.576 ± 61.664
Río Papaloapan	Nonano	2.545 ± 0.248	Nonano	0.141 ± 0.033
				ND - No detectado

Tabla 4. Selección del sistema biológico

Consorcio	Disponibilidad	Criterio					
		Hidrocarbonoclasta		Conocimiento de su origen	Mantenimiento sin perder su capacidad hidrocarbonoclasta	Identificado genéticamente	Capaz de crecer con residuos agro-industriales
Alifáticos	Aromáticos						
UAM-I	•	• a,b,h,i	• a,b,c,d,e,f,g,h,i	•a	•i	•d	•m
GOMEX 13	•	•j	•j	•j		•j	
Playa del Carmen	•	•k	•k	•k	•k		
Cancún	•	•l	•l	•l	•l		

a, Díaz-Ramírez *et al.*, 2003; b, Díaz-Ramírez *et al.*, 2007; c, Quijano *et al.*, 2010; d, Tzintzun-Camacho *et al.*, 2012; e, Lizardi-Jiménez *et al.*, 2012; f, Medina-Moreno *et al.*, 2013; g, Tec-Caamal *et al.*, 2018; h, Dutta *et al.*, 2018; i, Medina-Moreno *et al.*, 2005; j, García-Cruz *et al.*, 2018; k, Denis *et al.*, 2016; l, Lizardi-Jiménez *et al.*, 2013; m, Valdivia-Rivera *et al.*, 2019.

Artículos

El consorcio denominado "UAM-I" es el único que cumple con todos los criterios seleccionados, está integrado por: *Xanthomonas*, *Acinetobacter* *Bouvetti*, *Shewanella* y *Aquamicrobium lusatiense*.

El consorcio UAM-I fue aislado de la rizosfera de *Cyperus laxus* (Díaz-Ramírez *et al.*, 2003), una planta identificada en un pantano contaminado con hidrocarburos cercano a una refinería en el estado de Veracruz, que demostró poder crecer en presencia de estos contaminantes (Gallegos-Martínez *et al.*, 2000). El consorcio ha demostrado ser capaz de utilizar como única fuente de carbono: fracciones de hidrocarburo de petróleo maya (Díaz-Ramírez *et al.*, 2003; Medina-Moreno *et al.*, 2005), hexadecano (Lizardi-Jiménez *et al.*, 2012; Tzintzun-Camacho *et al.*, 2012; Medina-Moreno *et al.*, 2013; Nápoles-Álvarez, *et al.*, 2017) incluso a concentraciones altas (Tec-Caamal *et al.*, 2018), fenantreno, pireno (Nápoles-Álvarez, *et al.*, 2017) y diésel (Valdivia-Rivera *et al.*, 2019) también a altas concentraciones (Dutta *et al.*, 2018). Se ha demostrado que la principal forma de consumo del consorcio es mediante la emulsificación de los hidrocarburos (Medina-Moreno *et al.*, 2013; Dutta *et al.*, 2018), hasta en condiciones de alta salinidad (Nápoles-Álvarez *et al.*, 2017), en agua de mar y usando residuos agroindustriales (Valdivia-Rivera *et al.*, 2019).

Diseño del medio de cultivo

De acuerdo con el diagnóstico de presencia de hidrocarburos en los puntos de muestreo y a la posible fuente de ellos, se determinó utilizar

como fuente de carbono, diésel y gasolina (20 g L⁻¹), ambos se inocularon en la posible fuente de ellos, se determinó dos medios de cultivo: medio salino (MS) en agua de mar proveniente del Golfo de México (pH = 8.03 ± 0.04, [NaCl] = 32.90 ± 0.39 g L⁻¹) y medio mineral (MM) en agua destilada.

El inóculo inicial fue de 0.8 g L⁻¹ en peso seco del consorcio UAM-I, al sistema se le ajustó el pH al inicio de la operación a 6.5 con HCl 1 N (Lizardi-Jiménez *et al.*, 2012).

Selección del tipo de biorreactor

En la tabla 5 se muestra la selección del tipo de biorreactor de acuerdo con los criterios seleccionados.

Se seleccionó un biorreactor tipo *airlift* de vidrio con 0.9 L de volumen de trabajo (García-Cruz *et al.*, 2014) y aireación de 1.13 cm s⁻¹ introducido a través de un difusor de aire en forma de "L" con 7 orificios.

Cinéticas

Utilizando diésel como fuente de carbono

En la Figura 2 A, se muestra la concentración de sólidos suspendidos y diésel residual a lo largo del tiempo de cultivo, la Figura 3 A muestra las unidades de actividad emulsificante y el diámetro de gota del diésel a lo largo de tiempo de cultivo. En las Figuras 2 B y 3 B se observa el modelo de Gompertz para sólidos suspendidos, diésel residual, unidades de actividad emulsificante y diámetro de gota de diésel.

Tabla 5. Selección del tipo de biorreactor

Tipo de biorreactor	Criterio					
	Por lote	Aerobio	Menor esfuerzo cortante	Costo de energía bajo en comparación	Homogeneización eficiente	Mayor superficie de contacto
Tanque agitado	●a	●a				
Columna de burbujas	●a	●a	●b	●de		
Airlift	●a	●a	●bcd	●de	●cde	●cdef

a Van 't Riet y Van der Lans, 2011; b, Yusuf-Chisti y Jauregui-Haza, 2002; c, Lin y Chen, 2005; d, de Jesús *et al.*, 2017; e, Drandev *et al.*, 2016; f, Lizardi-Jiménez *et al.*, 2012

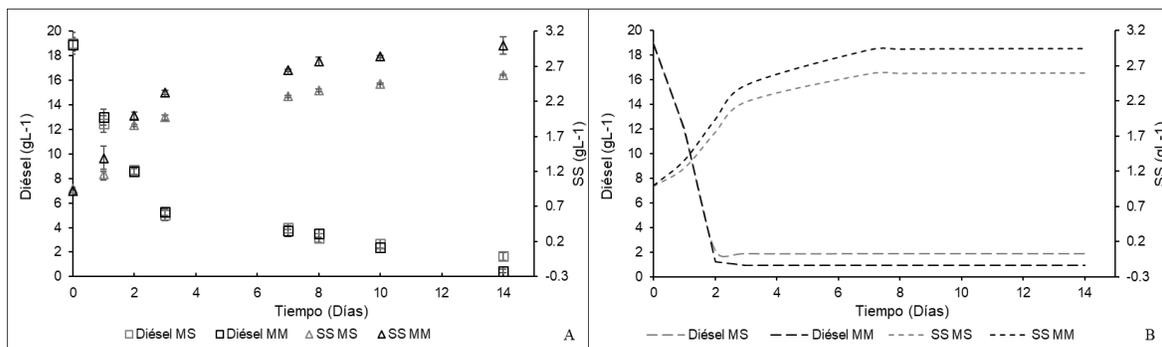


Figura 2. Producción de sólidos suspendidos (SS) y diésel residual a lo largo del tiempo de cultivo en medio salino (MS) y medio mineral (MM): A. Datos experimentales, B. Modelo de Gompertz

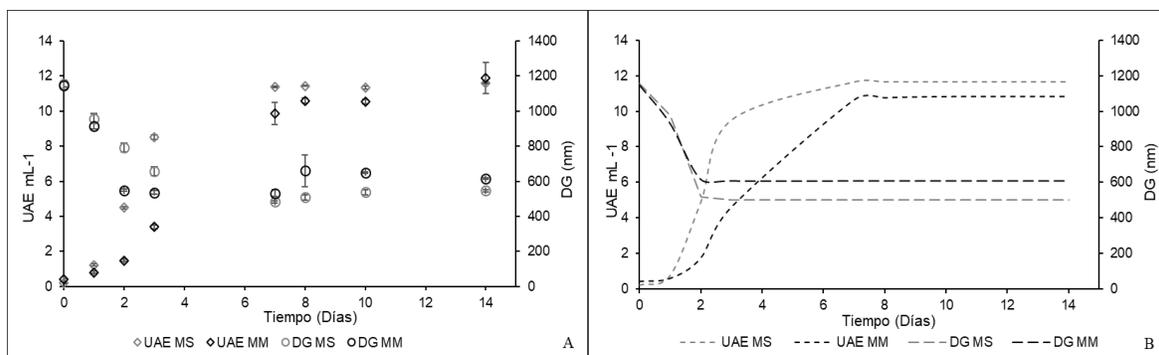


Figura 3. Unidades de actividad emulsificante (UAE) y diámetro de gota de diésel (DG) a lo largo del tiempo de cultivo en medio salino (MS) y medio mineral (MM): A. Datos experimentales, B. Modelo de Gompertz

Al final del tiempo de cultivo se obtuvo un $91.39 \pm 1.32\%$ de degradación de diésel en medio salino (Fig. 2 A) con un rendimiento de 0.094 ± 0.003 g SS g diésel⁻¹.

Este porcentaje de degradación y el rendimiento fue menor que en el estudio previo de Valdivia-Rivera *et al.*, 2019, donde se utilizó el mismo consorcio microbiano, pero en la presente investigación la concentración de diésel fue de 7 g L^{-1} arriba (Tabla 6).

Se muestra que el diámetro de las gotas de diésel disminuye a partir del primer día, e incrementan las unidades de actividad emulsificante. Una unidad de actividad emulsificante (UAE) es definida como "la absorbancia medida por 100 por el factor de dilución" (Patil y Chopade, 2001). Melgarejo-Torres *et al.* (2017) sugiere que la producción de bioemulsificantes probablemente estabiliza el tamaño de las gotas de hidrocarburo.

El diésel en medio mineral se degradó un $97.55 \pm 0.74\%$ al día 14. En el estudio realizado por Dutta *et al.*, 2018, el porcentaje de degradación fue menor (cerca del 80%), pero la concentración inicial fue de 130 g L^{-1} . En investigaciones donde se utilizó hexadecano a concentraciones de 13 g L^{-1} (Lizardi-Jiménez *et al.*, 2012; Medina-Moreno *et al.*, 2013) la degradación fue prácticamente total, esto puede deberse a que el hexadecano es más puro y por lo tanto más fácil de asimilar para el consorcio. Cuando la concentración inicial de hexadecano fue mayor (77 g L^{-1}) en la investigación de Tec-Caamal *et al.* (2018), el porcentaje de degradación fue menor (Tabla 7).

A partir de los parámetros cinéticos (Tabla 8), se puede deducir que la degradación de diésel en medio salino inició al 0.1 días, y la producción de biomasa al 0.3 días. Probablemente el consorcio comenzó a

Artículos

Tabla 6. Comparación de resultados de degradación de diésel con otras investigaciones en medio salino

Referencia	Fuente de carbono	Concentración inicial HC (g L ⁻¹)	Concentración final HC (g L ⁻¹)	Día de agotamiento	Porcentaje de degradación	Rendimiento g SS g diésel ⁻¹
Valdivia-Rivera <i>et al.</i> , 2019	Diésel	13	0	12	≈ 100	0.22 ± 0.03
Está investigación	Diésel	20	1.649 ± 0.308	14	91.39 ± 1.32	0.094 ± 0.003

Tabla 7. Comparación de resultados de degradación de diésel con otras investigaciones en medio mineral

Referencia	Fuente de carbono	Concentración inicial HC (g L ⁻¹)	Concentración final HC (g L ⁻¹)	Día de agotamiento	Porcentaje de degradación	Rendimiento g SS g diésel ⁻¹
Lizardi-Jiménez <i>et al.</i> , 2012	Hexadecano	13	0	6	≈ 100	0.58 ± 0.02
Medina-Moreno <i>et al.</i> , 2013	Hexadecano	13	0	10	≈ 100	≈ 0.61
Tec-Caamal <i>et al.</i> , 2018	Hexadecano	77	≈ 24.64	14*	60.78	0.24 ± 0.001
Dutta <i>et al.</i> , 2018	Diésel	130	≈ 25	10*	≈ 81	≈ 0.36
Está investigación	Diésel	20	1.649 ± 0.308	14	97.55 ± 0.74	0.112 ± 0.005

Tabla 8. Parámetros cinéticos de la degradación de diésel a partir del modelo Gompertz

Parámetro cinético	Medio salino				Medio mineral			
	SS	Diésel residual	UAE	DG	SS	Diésel residual	UAE	DG
Lag (d)	0.276	0.100	0.452	0.092	0.000	0.125	0.800	0.050
μ _m (d ⁻¹)	0.361	---	---	---	0.384	---	---	---
Q _m (d ⁻¹)	---	17.732	---	---	---	17.805	---	---
UAE _m (d ⁻¹)	---	---	2.280	---	---	---	1.214	---
DG _m (d ⁻¹)	---	---	---	21.948	---	---	---	22.809
Ti (d)	1.296	0.350	1.097	0.355	1.111	0.375	1.800	0.300

Lag (d), fase lag; μ_m(d⁻¹), tasa específica máxima de crecimiento; Q_m(d⁻¹), tasa específica máxima de consumo; UAE_m (d⁻¹), tasa específica máxima de unidades de actividad emulsificante; DG_m(d⁻¹), tasa específica máxima de disminución de diámetro de gota; Ti (d), tiempo de inflexión

consumir diésel a partir de las gotas emulsionadas que comenzaron su disminución de diámetro a los 0.092 días y se aceleró a los 0.355 días, prácticamente al mismo tiempo que se aceleró el consumo de diésel. Las unidades de actividad emulsificante tuvieron una fase lag de 0.4 días, más larga que la producción de sólidos suspendidos,

pero se aceleró su producción antes que la del consorcio microbiano, a los 1.097 días. Algunos trabajos asocian la producción de bioemulsificante con la producción de biomasa observándose una relación paralela entre la producción de biomasa y la actividad emulsificante (Gudiña *et al.*, 2015).

Los sólidos suspendidos en medio mineral no presentaron fase lag, pero las tasas

máximas de crecimiento y degradación de diésel fueron similares a las obtenidas en medio salino. Lo que sugiere que el consorcio UAM-I no necesita adaptarse al medio mineral, pero si le toma 0.276 días adaptarse al medio salino.

En trabajos donde se utiliza diésel como fuente de carbono el diámetro de la gota fue de 1600 nm a 600 nm aproximadamente (García-Cruz *et al.*, 2019) y Melgarejo-Torres *et al.*, (2017) obtuvo diámetros finales de gota de diésel de ≈ 560 nm, ambos similares a los resultados del presente trabajo. A pesar de que la fase lag de diámetro de gota de diésel fue menor en medio mineral y que la tasa específica máxima de disminución de diámetro de gota fue mayor en medio mineral, el tiempo de inflexión en ambos medios fue similar y el tamaño de gota fue menor al final del cultivo en medio salino. Es probable que en medio salino el consorcio tenga la necesidad de producir emulsificantes antes y con mayor tasa, debido a que la presencia de sal inhibe la formación de gotas. Se ha demostrado que la concentración de microgotas disminuye al aumentar la concentración salina (Silva *et al.*, 2017).

Utilizando gasolina como fuente de carbono

Está investigación es la primera evidencia de degradación de gasolina por medio del consorcio UAM-I. En medio salino el porcentaje de degradación fue de 95.05 ± 4.75 % con un rendimiento de 0.074 ± 0.008 g SS g gasolina⁻¹ y en medio mineral fue de 98.79 ± 1.19 % con un rendimiento de 0.104 ± 0.015 g SS g gasolina⁻¹.

Los porcentajes de degradación no presentan diferencia significativa, pero en cuanto al rendimiento, el mejor lo tiene el medio mineral, con un comportamiento similar que utilizando diésel como fuente de carbono.

En la tabla 9, podemos observar que la degradación de gasolina en medio salino tuvo una fase lag de 0, acelerando su consumo el 0.27 días. La fase lag de producción de sólidos suspendidos fue de 1.2 días y el crecimiento se aceleró hasta los 3.2 días, es decir, el consorcio inicio el consumo de gasolina antes de comenzar a crecer. Los diámetros de las gotas de gasolina disminuyeron conforme las unidades de actividad emulsificante aumentaron (Melgarejo-Torres *et al.*, 2017). En medio salino el consorcio presentó prácticamente el doble unidades de actividad emulsificante en comparación con el medio mineral al final del tiempo de cultivo. Esto puede deberse a que la concentración de microgotas tiende a disminuir al aumentar la concentración salina (Shi *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2017). En el medio mineral, la producción de sólidos suspendidos presentó una menor fase lag (0.44 días) y una mayor tasa específica máxima de crecimiento que en medio salino, un comportamiento similar que, utilizando diésel como fuente de carbono, es decir, el consorcio necesitó más tiempo en adaptarse fisiológicamente al medio salino (Maier y Pepper, 2015).

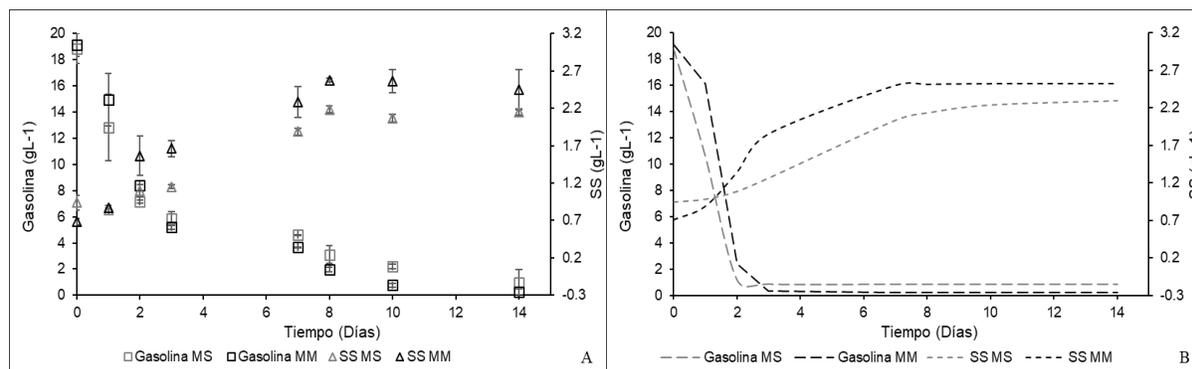


Figura 4. Producción de SS y gasolina residual a lo largo del tiempo de cultivo en medio salino MS y medio mineral (MM). A. Datos experimentales, B. Modelo de Gompertz

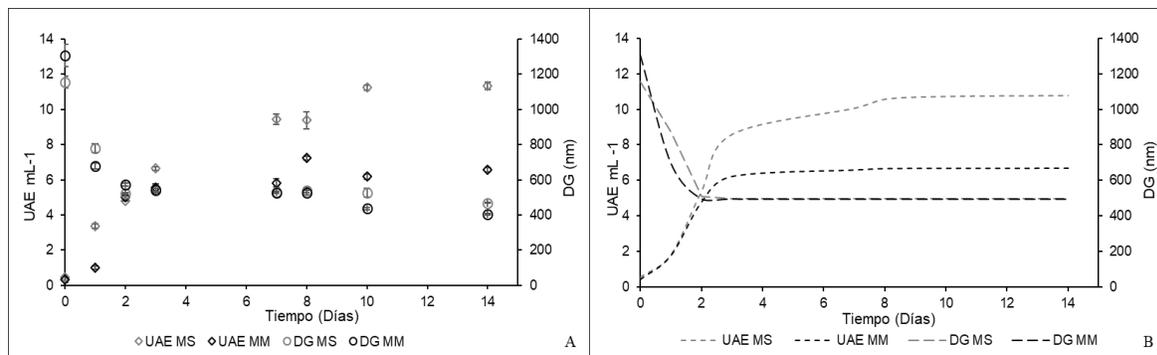


Figura 5. UAE y diámetro de gota de gasolina (DG) a lo largo del tiempo de cultivo en medio salino (MS) y medio mineral (MM). A. Datos experimentales, B. Modelo de Gompertz

Tabla 9. Parámetros cinéticos de la degradación de gasolina a partir del modelo Gompertz

Parámetro cinético	Medio salino				Medio mineral			
	SS	Gasolina residual	UAE	DG	SS	Gasolina residual	UAE	DG
Lag (d)	1.200	0.000	0.000	0.025	0.444	0.000	0.125	0.000
$\mu_m(d^{-1})$	0.166	---	---	---	0.430	---	---	---
$Q_m(d^{-1})$	---	16.470	---	---	---	12.515	---	---
$UAE_m(d^{-1})$	---	---	0.706	---	---	---	0.868	---
$DG_m(d^{-1})$	---	---	---	23.103	---	---	---	26.265
Ti (d)	3.200	0.270	1.667	0.275	1.556	0.357	1.375	0.200

Lag (d), fase lag; $\mu_m(d^{-1})$, tasa específica máxima de crecimiento; $Q_m(d^{-1})$, tasa específica máxima de consumo; $UAE_m(d^{-1})$, tasa específica máxima de unidades de actividad emulsificante; $DG_m(d^{-1})$, tasa específica máxima de disminución de diámetro de gota; Ti (d), tiempo de inflexión

Derecho a un medio ambiente sano

La Ley de Hidrocarburos (2016) Art. 95 declara de manera general que la industria de hidrocarburos deberá seguir criterios para la conservación de los ecosistemas, pero existen más industrias que pueden generar estos contaminantes. Las únicas concentraciones reguladas de hidrocarburos en cuerpos de agua, se encuentran en la NOM-143-SEMARNAT-2003 para aguas congénitas, es decir, en el punto de descarga, donde se declara que debe ser menor de 15 ppm para poder descargar en agua dulce y menor de 40 ppm para poder descargar en zonas marinas y la NOM-127-SSA1-1994 para agua de uso y consumo humano, que solo regula benceno, etilbenceno, tolueno y xileno con límites permisibles de 10, 300, 700 y 500 ppb respectivamente.

Anteriormente la NOM-015-SCT4-1994 también regulaba la concentración de HC en el agua de descarga de los sistemas separadores de agua e hidrocarburos instalados en las embarcaciones, pero esta norma fue cancelada en septiembre del 2010 (DOF, 2010). Actualmente la concentración límite de hidrocarburos en aguas de sentina (aguas de descarga de embarcaciones) está regulada por la Organización Marítima Internacional (OMI), la cual también es de 15 ppm (OMI, 1992; 2003). Actualmente en México no existe una norma que regule la concentración de HC en cuerpos de agua dulce y marinos aun cuando varios de ellos pueden afectar el ambiente y la salud humana. Los datos obtenidos en esta investigación podrían ser la base para la implementación del principio de precaución, es decir, medidas efectivas para prevenir el riesgo de daños graves e irreversibles al ambiente (Lizardi-Jiménez y Aguirre-García 2018).

Conclusiones

Existe contaminación por hidrocarburos en los puntos de las cuencas y los arrecifes muestreados en Golfo de México en el estado de Veracruz. Fue identificado octano y nonano en el mes de abril 2018 en más de 0.7 ppm e hidrocarburos de cadenas más largas y aromáticos, en julio 2018, como:

fenantreno (0.185 ± 0.019 ppm),
dotriacontano (67.914 ± 6.053 ppm),
tetracontano (18.511 ± 1.779 ppm),
hexatriacontano (90.825 ± 17.653 ppm),
octatriacontano (123.775 ± 31.709 ppm),
tetracontano (183.752 ± 44.010 ppm),
tetracontano (134.597 ± 9.578 ppm).

El 50% de ellos, incluso excediendo el límite de hidrocarburos permitidos en aguas congénitas a la descarga, de 15 ppm en agua dulce y 40 ppm en cuerpos marinos (NOM-143-SEMARNAT-2003).

Bajo los criterios de diseño del biorreactor, el consorcio microbiano UAM-I fue capaz de degradar gasolina y diésel en una concentración de 20 g L^{-1} . Fue degradado $91.39 \pm 1.32\%$ de diésel en medio salino y $97.55 \pm 0.74\%$ en medio mineral. La gasolina fue degradada en $95.05 \pm 4.75\%$ en medio salino y $98.79 \pm 1.19\%$ en medio mineral. La degradación en medio salino fue en menor porcentaje, probablemente debido a la concentración de sal en el medio ($32.36 \pm 0.45 \text{ g L}^{-1}$) (Nápoles-Álvarez *et al.*, 2017). En todos los experimentos se observó incremento en las unidades de actividad emulsificante.

Las leyes mexicanas protegen las aguas de contaminación de forma general, pero es necesario regular la concentración de HC en los cuerpos de agua para poder asegurar que la población goza de su derecho a un medio ambiente sano.

Referencias

- Adams, G. O., Fufeyin, P. T., Okoro, S. E., y Ehinomen, I. (2015). Bioremediation, biostimulation and bioaugmentation: a review. *International Journal of Environmental Bioremediation & Biodegradation*, 3(1), 28-39.
- Albert, L. A., Bozada-Robles, L., Uribe-Juárez, J., López-Portillo, J., Méndez-Alonzo, R.,

Antonio-Soto, K., Torres-Nachón, C. J. (2005). Evaluación Instantánea de los Efectos del Derrame de Petróleo en el Área de Nanchital – Coatzacoalcos, Veracruz (22 de Diciembre de 2004). En A. V. Botello, J. Rendón-von Osten, G. Gold-Bouchot, y C. Agraz-Hernández, Golfo de México: Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias (págs. 665-680). Campeche: S y G editores.

Amaral, P. F. F., Da Silva, J. M., Lehocky, B. M., Barros-Timmons, A. M. V., Coelho, M. A. Z., Marrucho, I. M., y Coutinho, J. A. P. (2006). Production and characterization of a bioemulsifier from *Yarrowia lipolytica*. *Process Biochemistry*, 41(8), 1894-1898.

Arthington, Á. H., Naiman, R. J., McClain, M. E., y Nilsson, C. (2010). Preserving the biodiversity and ecological services of rivers: new challenges and research opportunities. *Freshwater Biology*, 55(1), 1-16.

Beyer, J., Trannum, H. C., Bakke, T., Hodson, P. V., y Collier, T. K. (2016). Environmental effects of the Deepwater Horizon oil spill: a review. *Marine Pollution Bulletin*, 110(1), 28-51.

Chibueze-Azubuiké, C. C., Chikere, C. B., y Okpokwasili, G. C. (2016). Bioremediation techniques—classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 32(11), 180.

CONAGUA (2018). Estadísticas del agua en México, 26-69. Disponible en: http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf

CONAGUA (2016). Atlas del agua en México 2016. Disponible en: http://201.116.60.25/publicaciones/AAM_2016.pdf

Davenport, J., y Davenport, J. L. (2006). The impact of tourism and personal leisure transport on coastal environments: A review. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 67(1-2), 280-292.

- De Jesús, S. S., Moreira Neto, J., y Maciel Filho, R. (2017). Hydrodynamics and mass transfer in bubble column, conventional airlift, stirred airlift and stirred tank bioreactors, using viscous fluid: A comparative study. *Biochemical Engineering Journal*, 118, 70–81.
- Denis, B., Pérez, O. A., Lizardi-Jiménez, M. A., y Dutta, A. (2016). Numerical evaluation of direct interfacial uptake by a microbial consortium in an airlift bioreactor. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 119, 542–551.
- Díaz-Ramírez, I. J., Ramírez-Saad, H., Gutiérrez-Rojas, M., y Favela-Torres, E. (2003). Biodegradation of Maya crude oil fractions by bacterial strains and a defined mixed culture isolated from *Cyperus laxus* rhizosphere soil in a contaminated site. *Canadian Journal of Microbiology*, 49: 755-761.
- Díaz-Ramírez, I.J.; Escalante-Espinosa, E.; Favela-Torres, E.; Gutiérrez-Rojas, M. y Ramírez-Saad, H. (2007). Design of bacterial defined mixed cultures for biodegradation of specific crude oil fractions, using population dynamics analysis by DGGE. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 62 (1), 21–30.
- DOF (2010). AVISO de cancelación de la NOM-015-SCT4-1994. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5161176&fecha=29/09/2010
- DOF (2012). DECRETO que modifica al diverso por el que se declara Area Natural Protegida, con el carácter de Parque Marino Nacional, la zona conocida como Sistema Arrecifal Veracruzano. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5280548&fecha=29/11/2012
- DOF. (2017). ACUERDO por el que se dan a conocer los estudios técnicos de aguas nacionales superficiales de la Cuenca Hidrológica Río Actopan de la Región Hidrológica denominada Papaloapan. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5512819&fecha=12/02/2018.
- Drandev, S., Kalin, P., y Dimitre, K. (2016). Study of the hydrodynamics and mass transfer in a rectangular air-lift bioreactor, *Chemical Engineering Science*, 146, 180-188.
- Dutta, A., Valdivia-Rivera, S., y Lizardi-Jiménez, M. A. (2018). Simultaneous Diesel and Oxygen Transfer Rate on the Production of an Oil-degrading Consortium in an Airlift Bioreactor: High-dispersed Phase Concentration. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 16 (10).
- Froehner, S., Rizzi, J., Vieira, L. M., y Sanez, J. (2018). PAHs in Water, Sediment and Biota in an Area with Port Activities. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 75(2), 236-246.
- Gallegos-Martínez, M., Gómez Santos, A., González Cruz, L., Montes de Oca García, M. A., Yáñez Trujillo, L., Zermeño Eguía Lis, J. A., y Gutiérrez-Rojas, M. (2000). Diagnostic and resulting approaches to restore petroleum-contaminated soil in a Mexican tropical swamp. *Water Science and Technology*, 42(5-6), 377-384.
- García-Cruz, N. U., Canul-Puc, R., Sanchez-Avila, J., Gold-Bouchot, G., y Aguirre-Macedo, M. L. (2014). Potential crude oil degradation by a microbial consortium isolated from the Gulf of Mexico. *En Environmental Biotechnology and Engineering* (684-692). Bonumedia .
- García-Cruz, N. U., Sánchez-Avila, J. I., Valdés-Lozano, D., Gold-Bouchot, G., y Aguirre-Macedo, L. (2018). Biodegradation of hexadecane using sediments from rivers and lagoons of the Southern Gulf of Mexico. *Marine Pollution Bulletin*, 128(January), 202–207.
- García-Cruz, N. U., Valdivia-Rivera, S., Narciso-Ortiz, L., García-Maldonado, J. Q., Uribe-Flores, M. M., Aguirre-Macedo, M. L., y Lizardi-Jiménez, M. A. (2019). Diesel uptake by an indigenous microbial consortium isolated from sediments of the Southern Gulf of Mexico: Emulsion characterization. *Environmental Pollution*, 250, 849-855.

- García-Cruz, N. U., y Aguirre-Macedo, M. L. (2014). Biodegradación de petróleo por bacterias: algunos casos de estudio en el Golfo de México. *Golfo de México: Contaminación e Impacto Ambiental, Diagnóstico y Tendencias*, (November), 641–652.
- Gudiña, E. J., Pereira, J. F., Costa, R., Evtuguin, D. V., Coutinho, J. A., Teixeira, J. A., y Rodrigues, L. R. (2015). Novel bioemulsifier produced by a *Paenibacillus* strain isolated from crude oil. *Microbial cell factories*, 14(1), 14.
- Haas, A. F., Fairouz, M. F., Kelly, L. W., Nelson, C. E., Dinsdale, E. A., Edwards, R. A., y Lim, Y. W. (2016). Global microbialization of coral reefs. *Nature Microbiology*, 1(6), 16042.
- INEGI (2010). *HIDROLOGÍA*. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/hidrologia/>
- INEGI. (2015). *Catálogo de Territorio Insular Mexicano*. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reinat/territorioinsular/>
- INEGI. (2017). *Vehículos de motor registrados en circulación*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/proyectos/bd/continuas/transporte/vehiculos.asp?s=est>
- Jordán-Dahlgreen, E., y Rodríguez-Martínez, R. E. (2003). En *The Atlantic coral reefs of Mexico*. Elsevier Science, 131-158.
- Lamb, J. B., Willis, B. L., Fiorenza, E. A., Couch, C. S., Howard, R., Rader, D. N., y Harvell, C. D. (2018). Plastic waste associated with disease on coral reefs. *Science*, 359(6374), 460-462.
- León-Borges, J. A., y Lizardi-Jiménez, M. A. (2017). Hydrocarbon pollution in underwater sinkholes of the Mexican Caribbean caused by tourism and asphalt: Historical data series and cluster analysis. *Tourism Management*, 63, 179-186.
- Ley de Hidrocarburos. Disponible en: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LHidro_200521.pdf
- Lin, T. J., y Chen, P. C. (2005). Studies on hydrodynamics of an internal-loop airlift reactor in gas entrainment regime by particle image analyzer. *Chemical Engineering Journal*, 108(1–2), 69–79.
- Liu, Z., Liu, J., Gardner, W. S., Shank, G. C., y Ostrom, N. E. (2016). The impact of Deepwater Horizon oil spill on petroleum hydrocarbons in surface waters of the northern Gulf of Mexico. *Deep Sea Research Part II. Topical Studies in Oceanography*, 129, 292-300
- Lizardi-Jiménez, M. A., Saucedo-Castañeda, G., Thalasso, F., y Gutiérrez-Rojas, M. (2012). Simultaneous hexadecane and oxygen transfer rate on the production of an oil-degrading consortium in a three-phase airlift bioreactor. *Chemical Engineering Journal*, 160-165.
- Lizardi-Jiménez, M. A., Leal-Bautist, R. M., Ordaz, A., y Reyna-Velarde, R. (2013). Airlift bioreactors for hydrocarbon water pollution remediation in a tourism development pole. *Desalination and Water Treatment*, 1-6.
- Lizardi-Jiménez, M. A., y Aguirre-García, G. J. (2018). Carcinogenic Hydrocarbon Pollution in 8 Quintana Roo's Sinkholes: Biotechnology for Remediation and Social Participation for Prevention. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 16(10).
- Maier, R. M., y Pepper, I. L. (2015). Bacterial growth. En *Environmental microbiology* (37-56). Academic Press.
- Medina-Moreno, S. A., Jimenez-Gonzalez, A., Gutierrez-Rojas, M., y Lizardi-Jimenez, M. A. (2013). Hydrocarbon pollution studies of underwater sinkholes along Quintana Roo as a function of tourism development in the Mexican Caribbean. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 509-516.
- Medina-Moreno, S.A.; Huerta-Ochoa, S. y G.-R. (2005). Hydrocarbon biodegradation in oxygen-limited sequential batch reactors by consortium from weathered, oil-contaminated soil. *Canadian Journal of Microbiology*, 51(186), 231–239.

- Melgarejo-Torres, R., De la Concha-Gómez, A. D., Calva-Hernández, R., y Lizardi-Jiménez, M. A. (2017). Study of variation in droplet size of an aqueous–diesel emulsion formed by an oil-degrading microbial consortium. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 157, 951-957.
- Monroy-Dosta, M. C., Castro-Mejía, G., Ciprés-Chávez, Hernández-Sánchez, A., Reyes-Ruiz, A. N., Castro-Mejía, J., y Ramírez-Tórres, J. A. (2007). Identificación de microorganismos heterótrofos en la desembocadura del Río Actopan Chachalacas, Veracruz. *Revista digital E-BIOS*, 38-44.
- Nápoles-Álvarez, J., Ábalos-Rodríguez, A., Rodríguez-Pérez, S., Sánchez-Vázquez, V., y Gutiérrez-Rojas, M. (2017) "Airlift bioreactor using a bacterial mixed culture improves hydrocarbon degradation in contaminated salty water.", *Desalination and Water Treatment*, 86 (2017), pp. 28-34.
- NMX-AA-014-1980. CUERPOS RECEPTORES. - MUESTREO. Disponible en: http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa014-1980_09.pdf
- Narciso-Ortiz, L., Coreño-Alonso, A., Mendoza-Olivares, D., Lucho-Constantino, C. A., y Lizardi-Jiménez, M. A. (2020). Baseline for plastic and hydrocarbon pollution of rivers, reefs, and sediment on beaches in Veracruz State, México, and a proposal for bioremediation. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(18), 23035-23047.
- Narciso-Ortiz, L., Vargas-García, K. A., Vázquez-Larios, A. L., Quiñones-Muñoz, T. A., Hernández-Martínez, R., y Lizardi-Jiménez, M. A. (2020b). Coral reefs and watersheds of the Gulf of Mexico in Veracruz: Hydrocarbon pollution data and bioremediation proposal. *Regional Studies in Marine Science*, 35, 101155.
- NOM-015-SCT4-1994. (1994). Sistema de separadores de agua e hidrocarburos. Requisitos y especificaciones. Disponible en: <https://catalogonacional.gob.mx/FichaRegulacion?regulacionId=10120>
- NOM-127-SSA1-1994. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Disponible en: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2063863&fecha=22/11/2000
- NOM-143-SEMARNAT-2003. (2003). Que establece las especificaciones ambientales para el manejo de agua congénita asociada a hidrocarburos. Disponible en: <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1337/1/nom-143-semarnat-2003.pdf>
- OMI (1992). Guidelines and specifications for pollution prevention equipment for machinery space bilges of ships. Disponible: https://puc.overheid.nl/doc/PUC_2583_14/1/
- OMI (2003). Revised guidelines and specifications for pollution prevention equipment for machinery space bilges of ships. Disponible en: https://www.liscr.com/sites/default/files/liscr_imo_resolutions/MEPC%20Resolution%20107_49%2C%20as%20amended.pdf
- Ortiz-Lozano, L., Colmenares-Campos, C., y Gutiérrez-Velázquez, A. (2018). Submerged Coral Reefs in the Veracruz Reef System, Mexico, and its implications for marine protected area management. *Ocean & Coastal Management*, 158, 11-23.
- Patil, J. R., y Chopade, B. A. (2001). Studies on bioemulsifier production by *Acinetobacter* strains isolated from healthy human skin. *Journal of Applied Microbiology*, 91(2), 290-298.
- PEMEX (2015). Gasolina con contenido mínimo 87 octanos Hoja de datos de seguridad. Disponible en: <https://www.distribuidorariopanuco.com/pdfs/magna.pdf>
- PEMEX (2018). Diésel Hoja de Datos de Seguridad. Disponible en: <https://distribuidorariopanuco.com/pdfs/diesel.pdf>

- PROFEPA (2016). SEMAR, ASEA, PROFEPA y PEMEX realizan sobrevuelo donde se localiza el buque tanque Burgos. Disponible en: <https://www.gob.mx/profepa/videos/semar-asea-profepa-y-pemex-realizan-sobrevuelo-donde-se-localiza-el-buquetanque-burgos>
- PROY-NMX-AA-121/1-SCFI-2008. (2008). ANÁLISIS DE AGUA - AGUAS NATURALES EPICONTINENTALES, COSTERAS Y MARINAS. Disponible en: <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/AA/proy0909/proy-nmx-aa-121-1-scfi08.pdf>
- Quijano, G., Huerta-ochoa, S., y Gutie, M. (2010). Assessment of the limiting step of mass transfer in n -hexadecane biodegradation in a bubble column reactor. *Water Science & Technology*, 62.4, 906–914.
- Román-Jiménez, A. R., Mendoza-Briseño, M. A., Velázquez Martínez, A., Martínez-Méneez, M. R., Torres-Rojo, J. M., y Ramírez-Maldonado, H. (2011). Usos y riesgos del agua de la cuenca La Antigua, Veracruz, México. *Madera y Bosques*, 29-48.
- Ron, E. Z., y Rosenberg, E. (2014). Enhanced bioremediation of oil spills in the sea. *Current Opinion in biotechnology*, 27, 191-194.
- Salas-Pérez, J. J., y Granados-Barba, A. (2008). Oceanographic characterization of the Veracruz reefs system. *Atmósfera*, 281-301.
- SEMARNAT (2018). Nuevo Puerto de Veracruz, ejemplo de sustentabilidad. Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/nuevo-puerto-de-veracruz-ejemplo-de-sustentabilidad>
- SEMARNAT (2013). Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. Disponible en: https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/Cuencas_fi_nal_2014.pdf
- Shi, C., Zhang, L., Xie, L., Lu, X., Liu, Q., Mantilla, C. A., y Zeng, H. (2016). Interaction mechanism of oil-in-water emulsions with asphaltenes determined using droplet probe AFM. *Langmuir*, 32(10), 2302-2310.
- Silva, P. S., Zhdanov, S., Starov, V. M., y Holdich, R. G. (2017). Spontaneous emulsification of water in oil at appreciable interfacial tensions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 521, 141-146.
- Silva, R., Almeida, D., Rufino, R., Luna, J., Santos, V., y Sarubbo, L. (2014). Applications of biosurfactants in the petroleum industry and the remediation of oil spills. *International Journal of Molecular Sciences*, 15(7), 12523-12542.
- Sun, S., Hu, C., y Tunnell Jr, J. W. (2015). Surface oil footprint and trajectory of the Ixtoc-I oil spill determined from Landsat/MSS and CZCS observations. *Marine pollution bulletin*, 101(2), 632-641.
- Tec-Caamal, E. N., Jiménez-González, A., Ramírez-Vargas, R., Medina-Moreno, S. A., y Lizardi-Jiménez, M. A. (2018). Hydrodynamic effect of dispersed phase fraction on the mass transfer and uptake rate of hexadecane by an oil-degrading microbial consortium in an airlift bioreactor. *Biochemical Engineering Journal*, 130, 47–54.
- Tzintzun-Camacho, O., Loera, O., Ramírez-Saad, H., y Gutiérrez-Rojas, M. (2012). Comparison of mechanisms of hexadecane uptake among pure and mixed cultures derived from a bacterial consortium. *International Biodeterioration & Biodegradation* 70, 1-7
- Valdivia-Rivera, S., Martínez-Cano, A. K., Aguirre-García, G., y Lizardi-Jiménez, M. A. (2018). Hydrocarbon water-pollution related to chronic kidney disease in Tierra Blanca, a perfect storm. *Environment international*, 121, 1204-1209
- Valdivia-Rivera, S., Varela-Santos, E del C., Quiñones-Muñoz, T. A., Hernández-Martínez, R., y Lizardi-Jiménez, M. A. (2019). Production of hydrocarbon-degrading microorganisms using agricultural residues of *Mangifera indica* L. and *Carica papaya* as carbon source. *3 Biotech*, 9(2), 43.

Artículos

Van 't Riet, K., y Van der Lans, R. (2011). Mixing in Bioreactor Vessels. En M. Moo-Young, *Comprehensive Biotechnology* (64-77). Barcelona, España: Elsevier.

Varjani, S. J. (2017). Microbial degradation of petroleum hydrocarbons. *Bioresource Technology*, 223, 277-286.

Yusuf Chisti, Y., y Jauregui-Haza, U. J. (2002). Oxygen transfer and mixing in mechanically agitated airlift bioreactors. *Biochemical Engineering Journal*, 10(2), 143–153.

Zwietering, M. H., Jongenburger, I., Rombouts, F. M. y Van'T Riet K. (1990) "Modeling of the bacterial growth curve", *Applied and environmental microbiology*, 56, pp. 1875-1881.