

13. Eutrofización cultural y el fitoplancton desde la transdisciplina en el sureste mexicano: esfuerzo del Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad A.C.



KARINA ESQUEDA LARA*

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.319.013>

Resumen

El sur sureste mexicano es la segunda región más poblada del país, en él se encuentran dos de los ríos más caudalosos de México: el río Grijalva y el río Usumacinta; en sus cuencas se desarrollan actividades antrópicas como la ganadería extensiva y la agricultura comercial, lo que favorece el uso y aporte de fertilizantes. Además, el río Grijalva cuenta con cuatro obras hidráulicas que controlan el flujo que descarga al Golfo de México, mientras que el río Usumacinta cuenta con localidades establecidas a su largo, así como con descargas de aguas municipales, lo que enriquece con nutrientes adicionales al sistema de ambos ríos y la zona costero-marina. Los sistemas enriquecidos de nutrimentos por las actividades antrópicas que responden con múltiples cambios relacionados con la calidad del agua y del hábitat y ciclos biogeoquímicos son considerados sistemas en proceso de eutrofización. Éste es uno de los cambios globales más alarmantes, ya que involucra al menos seis de los subsistemas fundamentales del planeta, por lo que El Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad A.C. desarrolló diversos proyectos, algunos transdisciplinarios, lo que permitió contribuir con información en los tópicos de fitoplancton y morfoespecies potencialmente nocivos y tóxicos, indicadores, en sedimentos, de la eutrofización, nutrientes y otras variables

* Doctora en Ciencias. Investigadora del Centro de Investigación sobre el Cambio Global, Universidad Nacional Autónoma de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4498-1424>

fisicoquímicas en columna de agua. Los resultados generados pueden ser útiles para tomadores de decisiones del sistema de los ríos Grijalva y Usumacinta.

Palabras clave: *subsistemas fundamentales, florecimiento algal nocivo, Cyanobacteria.*

Introducción

El sur sureste mexicano es la segunda región más poblada del país, ya que cuenta con casi el 30 % de la población mexicana, es la región con la mayor diversidad de México y cuenta con una enorme riqueza natural y la mayor concentración de agua dulce, por lo que se distingue por su potencial agropecuario (Fidesur, 2021). Tabasco es una de las entidades que se encuentran en esta región. En él corren dos de los ríos más caudalosos del país, el río Grijalva y el río Usumacinta, en sus cuencas se desarrolla una ganadería extensiva de bovinos y la agricultura comercial, lo que favorece el uso de fertilizantes. Sumado a ello, el río Grijalva cuenta con cuatro obras hidráulicas (ubicadas en territorio Chiapaneco) que controlan el flujo que llega al territorio tabasqueño y descarga al Golfo de México, mientras que el río Usumacinta cuenta con localidades establecidas a su largo, así como con descargas de aguas municipales, lo que impacta y enriquece con nutrientes adicionales al sistema de ambos ríos y la zona costero-marina (Toledo, 2003).

Los sistemas enriquecidos de nutrimentos por actividades antrópicas que responden de manera directa o indirecta con múltiples cambios relacionados con la calidad del agua y del hábitat y ciclos biogeoquímicos son considerados sistemas en proceso de eutrofización (Cloern, 2001). Éste es uno de los cambios globales más alarmantes, ya que involucra, al menos seis de los subsistemas fundamentales del planeta, por lo que El Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad A.C. consideró conveniente la exploración del proceso de eutrofización y el impacto de esto sobre la diversidad fitoplanctónica como una de sus respuestas de los ecosistemas acuáticos en el territorio tabasqueño y la zona marino costera influenciada. Para ello desarrolló diversos proyectos, algunos transdisciplinarios, tanto para investigación bibliográfica como para campo, apoyados a través de diversos pro-

gramas como el de Fomento Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica y de Innovación, Incorporación de maestros y doctores para fomentar la competitividad y la innovación, Programa de Laboratorios Nacionales y Fondo Institucional de Fomento Regional para el Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación. Esto permitió contribuir a una línea base con una variedad de información en el sur del Golfo de México que puede ser útil para tomadores de decisiones del sistema de los ríos Grijalva y Usumacinta.

Eutrofización

Los nutrimentos son de gran importancia para los ecosistemas acuáticos, ya que de ellos depende la productividad primaria. Estos se pueden encontrar incrementados de forma natural, principalmente, en ambientes acuáticos con baja renovación hidrodinámica, lo que lleva a una eutrofización natural. Los nutrimentos también pueden incrementarse en los cuerpos acuáticos receptores debido a las actividades humanas y producirles una eutrofización cultural (Malone y Newton, 2020; Sedyaw et al., 2024). La eutrofización cultural es uno de los problemas más severos en los sistemas acuáticos continentales y costeros (Herrera-Silveira et al., 2011; Muciño-Márquez et al., 2017), ya que el aumento de las concentraciones de nitrógeno y fósforo generan, principalmente, un cambio en la composición específica y abundancia de las comunidades fitoplanctónicas (Andersen et al., 2006; Muciño-Márquez et al., 2017) y degradan la calidad del agua (Akinawo, 2023).

Los responsables principales de estas modificaciones en los ecosistemas acuáticos, al igual que muchas de las modificaciones en otros ambientes que se producen en el planeta, tienen su origen en el siglo XXI con el crecimiento demográfico y el desarrollo económico en todo el mundo, lo que ha intensificado los efectos negativos de las actividades humanas (Valiela et al., 1992; NRC, 2000; Malone y Newton, 2020), las cuales han transformado diversos subsistemas fundamentales del planeta como la biodiversidad, el clima, el océano, la atmósfera-estratosfera, el agua, los ciclos biogeoquímicos y la cobertura del suelo (Vitousek et al., 1997; Richardson et al., 2023). Entre los factores antrópicos que ejercen presión y modifican con ello la calidad

del agua y su biodiversidad, como consecuencia de la eutrofización cultural en los ecosistemas acuáticos, se encuentran: los vertidos de aguas residuales urbanas, agrícolas e industriales, acumulación de sedimentos y la modificación de las características ambientales (Allan, 2004; Jansen et al., 2014). Aunque en la actualidad este proceso se percibe con claridad, no siempre fue así, por lo que pasaron décadas para que los científicos reconocieran el proceso de eutrofización cultural, en especial la marina (Nixon, 1995).

El estudio del proceso de la eutrofización se inició en la década de 1960 con el proceso natural que presentan los sistemas epicontinentales envejecidos por procesos autóctonos (NAS, 1969; Cloern, 2001), lo que impulsó el primer simposio sobre la eutrofización realizado en 1967 (NAS, 1969), mientras que para reconocer el proceso de eutrofización en aguas marinas, tuvo que pasar poco más de una década (Nixon, 1995; Cloern, 2001), siendo hasta los años de la década de 1980 que se le reconoció como una grave problemática al lanzar una alerta para las zonas costeras. En ella se advirtió que, de no controlarse el proceso de eutrofización costera provocado por actividades humanas, éste amenazaría la biodiversidad por la alteración de la producción primaria en dichos ecosistemas (Arrhenius, 1992; Epstein y Rapport, 1996). A pesar de ello, los primeros trabajos sobre el proceso de eutrofización costera se presentaron hasta la década de 1990 (Vollenweider et al., 1992).

Dos de los conceptos que consideraron la complejidad de la eutrofización cultural están enfocados al proceso en la zona costera y son el propuesto por Goldberg (1995) en la década de 1990 y el de Cloern (2001) en la década del 2000. El primero considera al proceso como el ingreso de nutrientes vegetales como los fosfatos, nitratos y silicatos que provocan una producción excesiva de biomasa en las aguas y sedimentos a lo que le continúa una transferencia de materia orgánica a las aguas más profundas donde puede ser oxidada por el gas oxígeno disuelto, con lo que se pueden desarrollar condiciones de hipoxia y anoxia. A este enriquecimiento de nutrientes se le atribuye la disminución de los rendimientos de la pesca y la cría de mariscos, la proliferación de algas exóticas y tóxicas, las alteraciones de la estructura de las comunidades en los ecosistemas costeros y la disminución de la calidad del agua.

El segundo concepto es el presentado por Cloern (2001) que lo considera como un conjunto de respuestas directas e indirectas que incluyen cambios

vinculados a la transparencia del agua, distribución de plantas vasculares y biomasa de macroalgas, biogeoquímica de sedimentos y ciclo de nutrientes, sus proporciones y su regulación en la composición de la comunidad de fitoplancton, frecuencia de floraciones de algas tóxicas/dañinas, calidad del hábitat para metazoos, reproducción/crecimiento/supervivencia de invertebrados pelágicos y bentónicos, y cambios sutiles como en la estacionalidad de las funciones del ecosistema. Hoy en día sabemos que el proceso de la eutrofización cultural es complejo, tanto en ecosistemas epicontinentales como costeros (Rose et al., 2024), y existe a nivel mundial una creciente preocupación respecto a la sobreproducción de nutrientes proveniente de diversas fuentes, así como a sus efectos ecológicos.

Para la zona costera el enriquecimiento forzado en nitratos (procedentes en su mayoría del lavado de tierras agrícolas), en amonio y fosfatos (abundantes en vertidos urbanos), ha causado un desequilibrio del medio acuático que se manifiesta por una gran producción algal conocida como Florecimiento Algal Nocivo (FAN). Este FAN puede ser tóxico o no tóxico y puede ser producido, en especial, por especies de dinoflagelados y diatomeas, pero también por cianobacterias no solo marinas sino también de agua dulce que son arrastradas por los ríos desde los cuerpos epicontinentales eutrofizados, en los cuales es justo este último grupo taxonómico el que predomina en los ecosistemas epicontinentales eutrofizados (Day, 2000; Moncheva et al., 2001).

A pesar de que el estudio del proceso de eutrofización cultural inició décadas después que el de aguas epicontinentales, para la década del 2000 ya se sabía que 415 zonas costeras alrededor del mundo experimentaban alguna forma de eutrofización y 169 ya eran hipóxicas (Selman et al., 2008) y en tan solo un año las zonas costeras afectadas por la eutrofización superaban las 500 (Selman et al., 2009). Para el 2014, éstas se incrementaron a 550 (NOAA-EPA, 2014). Una de las regiones afectadas por este tipo de contaminación es el Océano Atlántico en el que se encuentra el Golfo de México. En él se encuentran importantes recursos ecológicos y económicos que influyen en las zonas costeras de manera que los sistemas lagunares-estuarios estudiados son susceptibles a la eutrofización desde la década de 1980, y en especial se considera que la porción sur tiene un potencial alto de eutrofización (Caso et al., 2004).

Por otro lado, también se conoce que en el Golfo de México se desarrolla la segunda zona muerta más extensa del planeta, la cual es ocasionada, principalmente, por el exceso de nutrientes contenidos en los residuos de los fertilizantes que fluyen por el río Mississippi y son vertidas en el mar y favorecen el crecimiento del fitoplancton llegando a producir el fenómeno conocido como Florecimiento Algal Nocivo (FAN). Cuando el fitoplancton muere, éste cae al fondo como desecho y su materia orgánica es consumida por bacterias que utilizan el oxígeno para su desintegración, de modo que se reduce la concentración de oxígeno (hipoxia) o llega a desaparecer en la columna de agua (anoxia) y los organismos marinos huyen de la zona o mueren en el fondo por asfixia (Kannan et al., 1997; Fuentes, 2015). Por lo que el proceso de eutrofización tiene implicaciones evidentes a gran escala y se está extendiendo desde hace décadas rápidamente (Díaz y Rosenberg, 1995; Malone y Newton, 2020).

Zona costera de Tabasco

El estado de Tabasco se ubica en la región sureste de México, entre las coordenadas 17° 19' 00" y 18°39' 00" de latitud Norte y los 94° 57' 00" y 94°08' 00" de longitud Oeste. Delimita al norte con la Bahía de Campeche en el Golfo de México, hacia el sur con el estado de Chiapas, al oeste con Veracruz, al noreste con Campeche y al sureste con Guatemala. Tiene una población aproximada de 2 402 598 habitantes (INEGI, 2021), distribuidos en 17 municipios que se subdividen a su vez en cu regiones geopolíticas (Palma-López et al., 2007).

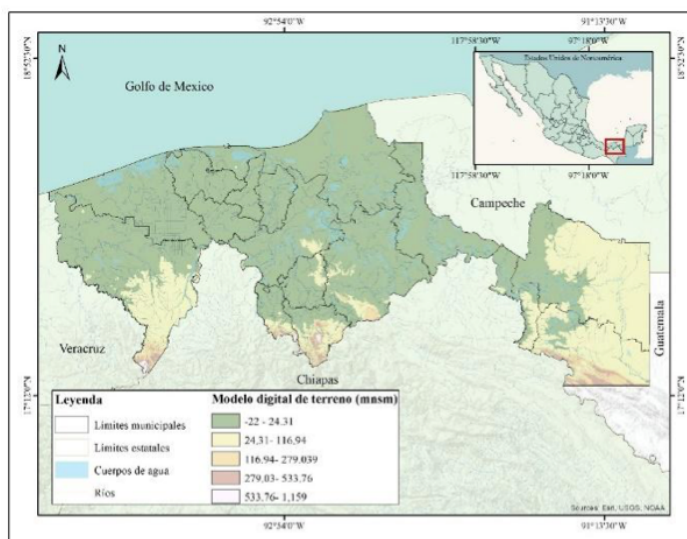
1. La región de Chontalpa (Huimanguillo, Cárdenas, Comalcalco, Paraíso, Cunduacán, Nacajuca y Jalpa de Méndez)
2. La región del centro (Villahermosa)
3. La región de la sierra (Teapa, Tacotalpa, Jalapa y Macuspana)
4. La región de los Ríos (Balancán, Tenosique, Emiliano Zapata, Jonuta y Centla)
5. Presenta una superficie total de 24,730.9 km² (INEGI, 2024) y 191 km de litoral ubicado entre la cuenca de los ríos Papaloapan, Grijalva y Usumacinta al sur del Golfo de México (Kumpf et al., 1999). El 96 %

del territorio continental de Tabasco está compuesto por llanura costera y está representada por humedales adyacentes a la zona costera (Sánchez y Barba, 2005). La temperatura media anual es de 27°C, la máxima promedio es de 36°C y se presenta en el mes de mayo y la mínima promedio es de 18.5°C durante enero.

La precipitación promedio anual en Tabasco es de 2 550 mm, condición que se presenta entre los meses de junio y octubre, periodo que corresponde a la temporada de lluvias. El territorio cuenta con 129 331.2 hectáreas de cuerpos de agua repartidas entre 33 ríos y 17 lagunas (INEGI, 2014), las cuales ocupan aproximadamente el 5.25 % de la superficie de Tabasco. En el estado fluyen los ríos más caudalosos de México, el Grijalva y el Usumacinta que junto con el río Coatzacoalcos representan aproximadamente un tercio de la descarga fluvial en las costas del sur del Golfo de México (Ortiz-Zamora et al. 2002).

El río Grijalva y el río Usumacinta, así como sus afluentes descienden desde la región montañosa de Chiapas y se incrementan aguas abajo en la llanura tabasqueña. Lo que da como resultado una serie de cauces que forman múltiples pantanos y áreas lagunares (figura 13.1; Mier y Terán-Suárez et al., 2006).

Figura 13.1. Principales cuerpos de agua en Tabasco



Fuente: elaboración propia.

El río Grijalva es el río principal que atraviesa el estado, tiene una longitud de 700 km y su origen se ubica en Guatemala, en la Sierra de Cuchumatanes. Éste recibe diferentes nombres según la localidad, en Guatemala se le conoce como El Cuilco, el cual entra a Chiapas y recibe el afluente de los ríos Lagartero, Dolores y Selegua para ahora formar el río San Gregorio. Por último, se le incorpora en Río San Miguel donde se le conoce como el Río Grijalva.

En él se encuentran cuatro obras hidráulicas que sirven para regular su caudal y generar energía eléctrica. Estas presas se ubican en la Sierra de Chiapas y son (1) Presa La Angostura, (2) Chicoasén, (3) Nezahualcóyotl o Malpaso y (4) Peñitas. En contraste con el río Grijalva, el río Usumacinta no cuenta con obras hidráulicas, pero tiene, al igual que el Grijalva, su origen en Guatemala. Este río marca una parte del límite con Chiapas en el norte para desembocar en el río Grijalva a unos kilómetros de la costa del Golfo de México (Cabrera y Cuc, 2002). El caudal del Usumacinta crece conforme avanza hacia el Grijalva gracias a la aportación de diversos afluentes a lo largo de su trayecto como el río San Pedro y San Pablo y el río Palizada.

El Usumacinta descarga hacia el Golfo de México mediante tres afluentes: el río Palizada, que desagua en la laguna de Términos en Campeche, la Barra de San Pedro, que confluye directo al mar, y la unión del Usumacinta con el Grijalva a través de la desembocadura de Frontera (De la Lanza, 2002). La cuenca de este río cuenta con una gran cantidad de áreas naturales protegidas de relevancia internacional como el Péten, Montes Azules, Pantanos de Centla y otras de importancia estatal como el Parque Estatal Cañón del Usumacinta y las Cascadas de Reforma (Galindo et al., 2006). Sin embargo, la cuenca del Usumacinta es también una de las zonas con los mayores índices de crecimiento poblacional.

De acuerdo con Toledo (2003) para el caso de México, el proceso de modernización de las estructuras productivas del país promovida por el gobierno federal provocó la ocupación del trópico, mediante una estrategia basada en tres líneas de acción: (1) Una política de colonización y desmontes orientada a eliminar grandes extensiones de selvas tropicales y establecer en las superficies desmontadas programas agrícolas y ganaderos. (2) El aprovechamiento de sus recursos hídricos, con la finalidad de crear el más gran-

de complejo hidroeléctrico del país. (3) La explotación de sus yacimientos petroleros.

Cabe destacar que los resultados de estas políticas se han reflejado directa e indirectamente en el funcionamiento de este frágil hidrosistema tropical, ya que, en tan solo medio siglo, Tabasco redujo sus espacios naturales y los transformó en favor de una agricultura comercial de plantación y una ganadería extensiva de bovinos (Toledo, 2003). El impulso a la agricultura y las agroindustrias favoreció el establecimiento de cultivos de caña de azúcar, coco, plátano, cacao y algunos cítricos en las planicies (Toledo, 2003) y, con ello, el uso de fertilizantes que representan un aporte adicional de nutrimentos a lo largo de la cuenca, que ingresan a las aguas costeras y marinas del Golfo de México. En el Usumacinta, además de las actividades agrícolas, otra fuente importante de nutrimentos son las descargas de aguas residuales de zonas urbanas y localidades a lo largo de ambos márgenes del Usumacinta, siendo los municipios más importantes Centla, Macuspana y Jonuta (Paredes et al., 2012).

El impulso del Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad para el estudio del proceso de eutrofización en territorio tabasqueño

Dada la importancia que tiene el proceso de eutrofización a nivel global, la presencia de la zona muerta en el norte del Golfo de México y la vulnerabilidad de las zonas costeras en tema de eutrofización y florecimientos algales en el sur del Golfo de México, así como a las características del territorio tabasqueño es que el Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad A.C. (CCGS) se planteó impulsar entre sus investigaciones la búsqueda de la posible presencia del proceso de eutrofización a través de sus indicadores como el fitoplancton, el oxígeno disuelto y los nutrientes en territorio tabasqueño y zona costera.

Para ello fue necesario el equipamiento tanto de campo como de laboratorio e iniciar con investigación básica a través de diversos proyectos en conjunto con otras instituciones, como el de tipo FOMIX: “Retos para la

sustentabilidad en la cuenca baja del Río Usumacinta en Tabasco: ecosistemas, cambio climático y respuesta social”, en el cual Esqueda-Lara et al. (2016) registraron por primera vez 129 morfoespecies del fitoplancton en el sistema lagunar Chaschoc ubicado en la cuenca del río Usumacinta, Tabasco, los cuales pertenecen a seis grupos taxonómicos (Cyanobacteria, Bacillariophyta, Chlorophyta, Cryptophyta, Euglenophyta y Dinophyta) y destacan 40 nuevos registros para la cuenca, 13 potencialmente tóxicas y 42 indicadoras de contaminación por materia orgánica o eutrofización.

Además, el CCGS se sumó al esfuerzo multi-institucional (Universidad Nacional Autónoma de México, El Centro de Investigación de Estudios Avanzados y El Instituto Tecnológico de Sonora) para la creación en el 2015 del Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera (LANRESC), en el cual se han desarrollado diversos proyectos incluyendo la exploración del oxígeno disuelto y de las especies de fitoplancton, en especial, las potencialmente tóxicas, lo que permitió a Esqueda-Lara et al. (2021) detectar, entre 2015 y 2016, la presencia de 86 morfoespecies de fitoplancton en el sistema lagunar costero de Carmen-Pajonal-Machona, pertenecientes a cuatro grupos taxonómicos (Cyanobacteria, Bacillariophyta, Chlorophyta y Dinophyta) registrando 10 nuevos registros para el sitio de los cuales 11 fueron potencialmente tóxicas y cinco potencialmente nocivas.

Otro proyecto multiinstitucional llevado a cabo por el CCGS y múltiples instituciones participantes fue de tipo Fordecyt: “Cambio global y sustentabilidad en la cuenca del río Usumacinta y zona marina de influencia. Base para la adaptación al cambio climático desde la Ciencia y la Tecnología (Conacyt)” en él se colaboró para el eje temático de agua con el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Nacional Autónoma de México. Con este proyecto Machain et al. (2020) exploraron un núcleo sedimentario cercano a la desembocadura del sistema Grijalva Usumacinta, al que se le analizó los ensamblajes de dinoquistes y foraminíferos bentónicos, el carbono orgánico e índices de hipoxia (A-E y PEB).

Con ello se registraron especies del género *Spiniferites* predominantes en los ensamblajes de dinoquistes, lo que sugiere el desarrollo de condiciones eutróficas. Además, se encontró concordancia con un contenido mayor de carbono orgánico y ensamblajes de foraminíferos bentónico e índices de hipoxia (índices A-E y PEB) que indicaron posibles concentraciones más

bajas de oxígeno en las aguas del fondo. Lo que sugiere que la zona podría verse afectada por procesos de desoxigenación y demuestra la necesidad de un monitoreo para proporcionar más evidencias con base científica para prevenir la creciente vulnerabilidad en esta zona costera.

Por otro lado, Cardoso-Mohedano et al. (2020) evaluaron variables físico-químicas como el oxígeno disuelto y los nutrimentos de nitrógeno y fósforo en la columna de agua influenciada por las descargas de los ríos en el ecosistema costero receptor durante la temporada de secas y de lluvias. Esto permitió registrar que la pluma fluvial del sistema del río Grijalva-Usumacinta alcanzó ~9 km mar adentro y que la concentración más baja de oxígeno disuelto para el 2017 durante la temporada de lluvias fue, dentro de la pluma fluvial, de 3,6 mg L⁻¹, con lo que concluyeron que de presentarse eventos de hipoxia (concentraciones de oxígeno ≤ 2 mg L⁻¹) estos se presentarían durante dicha temporada en aguas más profundas (>80 m de profundidad) y cuando los vientos sean débiles.

En cuanto a los nutrimentos, Cardoso-Mohedano et al. (2022) reconocieron que en la temporada de lluvias, las distribuciones superficiales del sistema del río Grijalva-Usumacinta en el 2017 fueron mucho más altas de manera significativa, por lo que la disponibilidad de nutrimentos sobre el sur del Golfo de México costero provoca un contraste en la descarga estacional de nutrimentos que parece aumentar el estado trófico en el área costera, pero que los procesos de transporte costero parecen prevenir la acumulación de nutrimentos y el agotamiento de oxígeno en la columna de agua durante la temporada de lluvias. Debido a que las descargas del sistema del río Grijalva y el Usumacinta (GURS: Grijalva-Usumacinta River Sistem) transportan altas concentraciones de nutrimentos, los eventos de flujo extremos podrían causar eventos de hipoxia en el área costera, sin embargo, la variabilidad climática interanual al aumentar o reducir la precipitación en el GURS, por tanto, modular estos efectos. Por lo que sugieren se necesita más investigación para caracterizar completamente la variabilidad de las descargas de nutrimentos de dicho sistema y su impacto en la biota costera.

Otros de los resultados de los proyectos antes mencionados sobre el fitoplancton fue el desarrollado por Esqueda-Lara et al. (2021) en la laguna El Cometa ubicado en Pantanos de Centla, en el cual se registraron las primeras 50 morfoespecies de fitoplancton de cinco grupos taxonómicos: Cya-

nobacteria, Bacillariophyta, Charophyta, Euglenophyta y Chrysophyta. Siete especies potencialmente tóxicas y cinco bioindicadoras de contaminación y de condiciones de eutrofización. Además, evaluar a la comunidad fitoplanctónica en la zona influenciada por el Grijalva-Usumacinta.

La constante presencia de nuevos registros de morfoespecies del fitoplancton y los de morfoespecies potencialmente nocivos y tóxicos demuestran la necesidad de continuar explorando sobre el tema en los cuerpos de agua tabasqueños. Su estudio como elemento para el estado trófico del ambiente y las implicaciones que tiene, en términos de cambio global, se considera oportuno. Además, los resultados de sus indicadores en sedimentos que sugieren el probable desarrollo del proceso de la eutrofización a través del ensamblaje de dinoquistes (estadio de vida de dinoflagelados, un grupo taxonómico estudiado como parte de la comunidad del fitoplancton) que sugiere condiciones eutróficas, en concordancia con el contenido de carbono orgánico y ensamblajes de foraminíferos bentónicos e índices de hipoxia (A-E y PEB) que indican posibles condiciones más bajas de oxígeno en aguas de fondo y los nutrimentos registrados en la zona influenciada por el sistema de los ríos Grijalva y Usumacinta deja clara la necesidad e importancia de caracterizar y monitorear la variabilidad de las descargas de nutrimentos de dicho sistema y su impacto en la biota costera, de manera que permita prevenir el incremento de la vulnerabilidad del territorio (incluyendo la zona costera). Los resultados de todos estos trabajos de investigación contribuyen a una línea base con variedad de información en el sur del Golfo de México que puede ser útil para tomadores de decisiones del sistema de los ríos Grijalva y Usumacinta.

Conclusiones

La investigación transdisciplinaria para abordar las problemáticas del cambio global como el proceso de eutrofización, requiere del esfuerzo disciplinario, multidisciplinario e interdisciplinario con miras a la transdisciplinariedad. Los cambios que suceden a nivel global como las alteraciones de los subsistemas fundamentales del planeta son complejos en sus causas, desarrollo y efectos, se relacionan entre ellos y requieren la suma del conoci-

miento y acciones locales, nacionales e internacionales que permitan amortiguar o mitigar sus efectos. Los resultados aquí mencionados son, hasta el día de hoy, solo algunos de los realizados en territorio tabasqueño que involucran de algún modo las temáticas de eutrofización, hipoxia y fitoplancton, demuestran que existe un proceso de eutrofización que debe continuar explorándose en otros sitios y de ser posible monitorearse para conocer su trayectoria, los tiempos de ésta y si es posible detener. Para ellos se requiere del esfuerzo de la comunidad académica y de los tomadores de decisiones tanto dentro como fuera del estado.

Agradecimientos

Al MCA Candelario Peralta Carreta por la elaboración del mapa para este trabajo.

Referencias

- Agencia Europea de Medio Ambiente. (1998). Medio ambiente marino y litoral. En Agencia Europea de Medio Ambiente (Ed). *El medio ambiente en Europa: segunda evaluación* (pp. 1-31). Copenhagen, Denmark: Agencia Europea de Medio Ambiente.
- Akinawo, S. O. (2023). Eutrophication: causes, consequences, physical, chemical and biological techniques for mitigations strategies. *Environmental Challenges*, 12, 100733. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100733>
- Allan, J. D. (2004). Landscapes and riverscapes: the influence of land use on stream ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 35, 257-284. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.35.120202.110122>
- Andersen, J. H., Schlüter, L. y AErtebjerg, G. (2006). Coastal eutrophication: recent developments in definitions and implications for monitoring strategies. *Journal of Plankton Research*, 28(7), 621-628. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbl001>
- Aranda, N.C. (2004). *Eutrofización y calidad del agua de una zona costera tropical* [Tesis de doctorado, Universita de Barcelona. Departament d'Ecologia].
- Arrhenius, E. (1992). Protecting tropical and subtropical coastal waters: a resource for future generations. *A Journal of the Human Environment*, 21(7), 488-490.
- Cabrera, J. y Cuc, P. (2002). *Ambiente, conflicto y cooperación en la cuenca del río Usumacinta*. Costa Rica: Fundación para la Paz y la Democracia Proyecto Conflicto y Cooperación Ambiental en Cuencas Internacionales Centroamericanas.

- Cardoso-Mohedano, J. G., Canales-Delgadillo, J. C., Machain-Castillo, M. L., Sanchez-Muñoz, W. N., Sanchez-Cabeza, J. A., Esqueda-Lara, K., Gómez-Ponce, M. A., Ruiz-Fernández, A.C., Alonso-Rodríguez, R., Lestayo-González, J. A., y Merino-Ibarra, M. (2022). Contrasting nutrient distributions during and rainy seasons in coastal waters of the southern Gulf of Mexico driven by the Grijalva-Usumacinta River discharges. *Marine Pollution Bulletin*, 178, 113584. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113584>
- Cardoso-Mohedano, J. G., Canales-Delgadillo, J. C., Machian-Castillo, M. L., Hernández-Hernández, J. G., Sánchez-Cabeza, J. A., Ruiz-Fernández, A.C., Alonso-Rodríguez, R., Gómez-Ponce, M. A., Esqueda-Lara, K., Merino-Ibarra, M., Hernández-Bece-rril, D. U., y Gelabert-Fernández, R. (2020). Absence of hipoxia events in the adjacent coastal waters of Grijalva-Usumacinta River, Southern Gulf of Mexico. *Marine Pollution Bulletin*, 156, 111174. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111174>
- Caso, M., Pisant, I. y Ezcurra, E. (2004). *Diagnóstico ambiental del Golfo de México*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto de Ecología.
- Cloern, J. E. (2001). Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. *Marine Ecology Progress Series*, 210, 223-253. <https://doi.org/10.3354/meps210223>
- Day, J. W., Jr., Britsch, L. D., Hawes, S. R., Shaffer, G. P., Reed, D. J., y Cahoon, D. (2000). Pattern and process of land loss in the Mississippi Delta: a spatial and temporal analysis of wetland habitat change. *Estuaries*, 23(4), 425-438. <https://doi.org/10.2307/1353136>
- De la Lanza, E. G. (2002). Recursos hidrológicos de México. En J. F. Abarca y M. Herzing (Eds.) *Manual para el manejo y la conservación de los humedales en México* (3ª ed.). Phoenix, Arizona: Dirección General de Vida Silvestre-SEMARNAT, Arizona Game and Fish Department, North American Wetland Conservation Act., U.S. Fish and Wildlife Service, Convención Ramsar, U.S. State Department, Ducks Unlimited of México-A.C., Pronatura Noreste, Canadian Wildlife Service, Society of Wetlands Scientists.
- Diaz, R. J., y Rosenberg, R. (1995). Marine benthic hypoxia-review of ecological effects and behavioural responses of marine macrofauna. *Oceanography Marine Biology Annual Review*, 33, 245-303.
- Diaz, R. J. y Rosenberg, R. (2008). Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, 321, 926-929. <https://doi.org/10.1126/science.1156401>
- Epstein, P. R., y Rapport, D. J. (1996). Changing coastal marine environments and human health. *Ecosystem Health*, 2(3), 166-176.
- Esqueda-Lara, K., Carnero-Bravo, V., Varona-Cordero, F., Rincones-Reyes, K. M., Ahuja-Jiménez, Y., García-Valdéz, C. G. y Sánchez, A. J., (2021). Fitoplancton en el sistema tropical Carmen Pajonal Machona, Tabasco. *Hidrobiológica*, 31(1), 53-68. <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbshidro/2021v31n1/Esqueda>
- Esqueda-Lara, K., Sánchez, A. J., Valdés-Lagunes, G., Salcedo, M. A., Franco-Torres, A. E., y Florido, R. (2016). Fitoplancton en el humedal tropical Chaschoc en la cuenca baja del río Usumacinta. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87, 1177-1188. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2016.10.015>

- Esqueda-Lara, K., Sánchez, A. J., Salcedo, M. A., Rincones-Reyes, K. M. y Popoca-Cruz, P. E. (2021). Morfoespecies de fitoplancton de la laguna el cometa en la reserva de la biosfera pantanos de Centla. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, Número, Especial I, e2707. <https://doi.org/10.19136/era.a8n1.2707>
- FIDESUR (Fideicomiso para el Desarrollo Regional del Sur Sureste). (2021). El Sur Sureste una región rica pero rezagada. <https://sursureste.org.mx/region/>
- Fuentes, I. L. (2015). Hipoxia marina en el Golfo de México "Zona Muerta". *Muy interesante*, 4, 70-73.
- Galindo, A., Gama, L., Salcedo, M., Ruiz, S., Morales, A. y Zequeira, C. (2006). Programa de ordenamiento ecológico del estado de Tabasco. México: Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Gobierno del Estado de Tabasco.
- Goldberg, E. D. (1995). Emerging problems in the coastal zone for the twenty-first century. *Marine Pollution Bulletin*, 31(4-12), 152-158. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(95\)00102-5](https://doi.org/10.1016/0025-326X(95)00102-5)
- Herrera-Silveira, J. A., Morales-Ojeda, S. M., y Cortes-Balan, T. O. (2011). *Eutrofización en los ecosistemas costeros del Golfo de México*. SEMARNAT-NOAA-GEF-UNIDO.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (10 de agosto de 2024). Cuéntame sobre México. Información por Entidad, México. Inegi. <http://cuentame.inegi.org.mx/mo-nografias/informacion/tab/territorio/clima.aspx>
- (2014). Conociendo México (4ª ed.). Aguascalientes, México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- (2021). Panorama sociodemográfico de Tabasco -Censo de población y vivienda 2020. México: CPV/Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Janse, J. H., Kuiper, J. J., Weijter, M. J., Westerbeek, E. P., Jeuken, M. H. L., Bakkenes, M., Alkemade, R., Mooij, W. M., y Verhoeven, J. T. A. (2014). GLOBIO-Aquatic, a global model of human impact on the biodiversity of inland aquatic ecosystems. *Environmental Science & Policy*, 48, 99-114. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.12.007>
- Kannan, K., Senthilkumar, K., Loganathan, B. G., Takahashi, S., Odell, D. K., y Tanabe, S. (1997). Elevated accumulation of tributyltin and its breakdown products in bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) found stranded along the U.S. Atlantic and Gulf coasts. *Environmental Science and Technology*, 31, 296-301. <https://doi.org/10.1021/es960657d>
- Kumpf, H., Steindenger, K., y Sherman, K. (1999). *The Gulf of Mexico large marine ecosystem: assessment, sustainability, and management*. Massachusetts, USA: Blackwell Scientific Inc.
- Malone, T. C., y Newton, A. (2020). The globalization of cultural eutrophication in the coastal ocean: causes and consequences. *Frontiers in Marine Science*, 7, 670. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00670>
- Mier y Terán-Suárez, J., Castro-Georgana, V., Mayor-Nucamendi, H. F. y Brito-López, J. A. (2006). Floraciones algales en Tabasco. *Salud en Tabasco*, 12(1), 413-422.
- Moncheva, S., Gotsis-Skretas, O., Pagou, K., y Krastev, A. (2001). Phytoplankton blooms in Black Sea and Mediterranean coastal ecosystems subjected to anthropogenic

- eutrophication: similarities and differences. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 53, 281-295. <https://doi.org/10.1006/ecss.2001.0767>
- Muciño-Márquez, R. E., Aguirre-León, A. y Figueroa-Torres, M. G. (2017). Evaluación del estado trófico en los sistemas fluvio-lagunares Pom-Atasta y Palizada del Este, Campeche, México. *Hidrobiológica*, 27(3), 281-291.
- National Academy of Science (NAS). (1969). *Eutrophication: causes, consequences, correctives*. Washington, D.C. National Academy of Science.
- National Oceanic and Atmospheric Administration-Environmental Protection Agency (NOA-EPA). (2024). Supported scientists find average but large Gulf dead zone. <https://www.noaa.gov/media-release/noaa-epa-supported-scientists-find-average-but-large-gulf-dead-zone>
- National Research Council (NRC). (2000). *Clean coastal waters. Understanding and reducing the effects of nutrient pollution*. Washington, D.C. National Academy of Science, National Academic Press.
- Nixon, S.W. (1995). Coastal marine eutrophication: A definition, social causes, and future concerns. *Ophelia*, 41(1), 199-219. <https://doi.org/10.1080/00785236.1995.10422044>
- Ortiz-Zamora, G., Huerta-Díaz, M. A., Salas-de-León, D. A., y Monreal-Gómez, M. A. (2002). Degrees of pyritization in the Gulf of Mexico in sediments influenced by the Coatzacoalcos and Grijalva-Usumacinta Rivers. *Ciencias Marinas*, 28(4), 369-379. <https://doi.org/10.7773/cm.v28i4.238>
- Palma-López, D. J., Cisneros, J. D., Moreno, E. C., y Rincón-Ramírez, J. A. (2007). *Suelos de Tabasco: su uso y manejo sustentable*. México: Colegio de Postgraduados-Isprotab-fundacion produce tabasco.
- Paredes, V. P. Pedrozo-Acuña, A., Rodríguez, R. J., Domínguez, M. R., y González, V. F. (7-9 de noviembre de 1012). *Estimación de mapas de inundación con una probabilidad de ocurrencia en la cuenca del río Usumacinta* [Ponencia]. Memorias del XXII Congreso Nacional de Hidráulica. Acapulco, Guerrero, México. <https://amh.org.mx/>
- Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S.E., Donges, J. F., Drüke, M., Fetzer, I., Bala, G., von Bloh, W., Feulner, G., Fiedler, S., Gerten, D., Gleeson, T., Hoffmann, M., Huiskamp, W., Kummer, M., Mohan, C., Nogués-Bravo, D., Petri, S., Porkka, M., Rahmstorf, S., Schaphoff, S., Thonicke, K., Tobian, A., Virkki, V., Wang-Erlandsson, L., Weber, L., y Rockström, J. (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science Advances*, 9(37), eadh2458. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>
- Rose, K. C., Ferrer, E.M., Carpenter, S. R., Crowe, S. A., Donelan, S. C., Garçon, V. C., Grégoire, M., Jane, S. F., Leavitt, P. R., Levin, L. A., Oschlies, A., y Breitbart D. 2024. Aquatic deoxygenation as a planetary boundary and key regulator of Earth system stability. *Nature ecology & evolution*, 8, 1400-1406. <https://doi.org/10.1038/s41559-024-02448-y>
- Sánchez, A. J. y Barba, E. (2005). Biodiversidad de Tabasco. En J. Bueno, F. Álvarez y S. Santiago (Eds.), *Biodiversidad del estado de Tabasco*. México: Instituto de Biología Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, pp. 1-16.

- Sedyaaw, P., Bhatkar, V. R., y Sawant, A. N. (2024). A review on effects of eutrophication in aquatic ecosystem. *International Journal of Development Research*, 14(04), 65362-65369 <https://doi.org/10.37118/ijdr.28143.04.2024>
- Selman, M., y Greenhalgh. (2009). *Eutrophication sources and drivers of nutrient pollution. Water quality: eutrophication and hypoxia water quality: eutrophication and hypoxia policy note series No 2*. Washington, D. C.: World Resources Institute.
- Selman, M., Greenhalgh, S., Diaz, R., y Sugg, A. (2008). *Eutrophication and hypoxia in coastal areas: a global assessment of the state of knowledge. Water quality: eutrophication and hypoxia policy note series No 1*. Washington, D. C.: World Resources Institute.
- Sonarghare, P. C., Masram, S. C., Sonparote, U. R., Khaparde, K. P., y Kharkate, S. K. (2000). Causes and effects of eutrophication on aquatic life (a review). *International Journal for Environmental Rehabilitation and Conservation*, 11(SP2), 213-218. <https://eoi.citefactor.org/10.11208/essence.20.11.SP2.147>.
- Toledo, A. (2003). *Ríos, costas, mares. Hacia un análisis integrado de las regiones hidrológicas de México*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, El Colegio de Michoacán.
- Valiela, I., Foreman, K., LaMontagne, M., Hersh, D., Costa, J., Peckol, P., DeMeo-Anderson, B., D'Avanzo, C., Babione, M., Chi-Ho, S., Brawley, J., y Lajtha, K. (1992). Couplings of watersheds and coastal waters: sources and consequences of nutrient enrichment in Waquoit Bay, Massachusetts. *Estuaries*, 15(4), 443-457. <https://doi.org/10.2307/1352389>
- Vitousek, P. M., Mooney, H. A., Lubchenco, J., y Melillo, J. M. (1997). Human domination of earth's ecosystems. *Science*, 277, 494-499. <https://doi.org/10.1126/science.277.5325.49>
- Vollenweider, R. A. (21-24 de marzo de 1992). Coastal marine eutrophication: principles and control. Proceedings of an International Conference, Bologna, Italy, *Marine Coastal Eutrophication*, 1-20. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-89990-3.50011-0>

