

Monitoreo ambiental en estuarios micromareales: caso de estudio río Jamapa

Environmental monitoring of microtidal estuaries: Case Study Jamapa River

Rosario Sanay González^a | Héctor Perales Valdivia^b

Recibido: 23 de marzo de 2022.

Aceptado: 11 de abril de 2022.

^a Universidad Veracruzana, Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías, Boca del Río, México. Contacto: rsanay@uv.mx *Autora para correspondencia.

^b Universidad Veracruzana, Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías, Boca del Río, México. Contacto: hperales@uv.mx

Resumen: Destacando las características de los estuarios de cuña de sal, se planteó un plan de monitoreo ad hoc para el río Jamapa que permitió determinar el nivel de estratificación por salinidad, ante la variación anual de la descarga del río en diversas locaciones a lo largo del estuario. La estratificación es un factor que inhibe el intercambio de agua entre el fondo y la superficie, favoreciendo la acumulación de nutrientes, contaminantes, y materia orgánica que puede dar como resultado la aparición de florecimientos algales y episodios de baja de oxígeno disuelto. Para determinar el grado de estratificación se hace uso del índice global de estratificación salina Sp.

Palabras clave: Monitoreo ambiental; estuarios micromareales; río Jamapa.

Abstract: *Standing out the characteristics of salt wedge estuaries, a specific monitoring plan for the Jamapa River was conceived that allowed to establish the salt stratification-level due to the yearly variation of river discharge in locations along the estuary. Stratification is a limiting factor for bottom and surface water interchange, promoting nutrient, pollutants and organic matter accumulation resulting in a possible algal bloom or depletion of dissolved oxygen. Stratification level was determined through the global salinity index Sp.*

Keywords: *Environmental Monitoring, Microtidal Estuaries, Jamapa River.*

1. Introducción

Históricamente, las zonas costeras han concentrado a gran parte de la población mundial (Aguilera y Borderías-Uribeondo, 2010) ya que permiten el desarrollo de una amplia gama de actividades como transporte, extracción de hidrocarburos, generación de energía eléctrica, pesca y acuicultura (Kennish, 2000). De entre éstas, los estuarios y lagunas costeras se destacan por ser ambientes altamente productivos y ecológicamente importantes desde una perspectiva de los servicios ecosistémicos, y en particular para la pesca (Schelske y Odum, 1961; Potter et al., 2015). El impacto de las actividades económicas, y los inherentes a los grandes asentamientos humanos (p. ej. vertido de aguas residuales a los cuerpos de agua), han ocasionado la degradación de los sistemas costeros, registrándose una acelerada pérdida de biodiversidad, decreciente calidad del agua y pérdida de su capacidad para recuperarse de las perturbaciones ya sean naturales o antropogénicas (Worm et al., 2006) comprometiendo el capital natural del cuerpo de agua.

Para promover la integridad ecológica de los estuarios y lagunas costeras, es necesario contar con planes de manejo adecuados basados en programas de monitoreo ambiental (Behmel et al., 2016; Gonenc & Wolflin, 2004). Estos programas proveerán la información necesaria para caracterizar los sistemas costero, además de permitir discernir entre el comportamiento normal y anómalo de los diferentes parámetros de ambiente medidos (Gray y Shimshack, 2011). Las anomalías pueden obedecer tanto a perturbaciones naturales como antropogénicas. Lo deseable es que la información generada posibilite la identificación de los efectos adversos en etapas tempranas.

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, por sus siglas en inglés), define al monitoreo ambiental como:

Un proceso de observación repetitiva para propósitos definidos, de uno o más elementos del medio ambiente, de acuerdo con horarios preestablecidos en el espacio y en el tiempo y utilizando metodologías comparables para la detección ambiental y la recopilación de datos” (Gonenc & Wolflin, 2004).

Los programas de monitoreo tienen el propósito de generar información para resolver alguno, o varios problemas del ambiente, generados por actividades humanas. De acuerdo a Days et al (1989), dichos problemas se pueden agrupar en cinco categorías: i) enriquecimiento (exceso de aporte de nutrientes), lo que puede derivar en procesos de eutricación, ii) alteraciones físicas, iii) sobrepesca, iv) introducción de especies exóticas y v) toxinas.

Una vez identificado el problema ambiental a resolver en un estuario específico, y antes de diseñar el programa de monitoreo, es necesario establecer los objetivos específicos, identificar los atributos del ecosistema y, documentar y ubicar los datos disponibles (Behmenl et al., 2016). Se debe advertir que, el monitoreo se distingue de la colección de datos por su carácter de continuidad y de largo plazo (Gonenc & Wolflin, 2004). La colección de datos a menudo se refiere como monitoreo de corto plazo.

1. Los estuarios de cuña salada

1.1. Descripción

Los estuarios y lagunas costeras son zonas de transición entre ambientes terrestres y marinos, así como la principal vía de exportación de materiales de los continentes hacia el océano (Sierra et al, 2002). Se definen como “cuerpos de agua semicerrados, con libre conexión con el mar (la cual puede ser permanente o intermitente) y dentro del cual se mezclan el agua marina con el agua dulce que proviene de los ríos” (Cameron y Pritchard, 1963).

La dinámica de los estuarios está influenciada principalmente por la descarga de los ríos, el efecto local y remoto del viento, la mareas y el oleaje, y es modulada por factores geomorfológicos como la batimetría, dimensiones y forma de la cuenca, así como de curvatura de la línea de costa (Sierra et al, 2002). La importancia relativa de los forzamientos del sistema, definirán el grado de mezcla de la columna de agua, resultando en estuarios verticalmente mezclados, parcialmente estratificados, fuertemente estratificados o de cuña salina (Valle-Levinson, 2010).

En particular, los estuarios fuertemente estratificados o de cuña salada se desarrollan, más no son exclusivos, en las partes bajas de los ríos que desembocan al mar en zonas cuyo rango de marea es menor a 2 m (e.g. ambientes micromareales), nombrados como estuarios de desembocadura de río (Ibañez et al, 1997). En éstos, la proporción de descarga fluvial respecto al flujo de marea es lo suficientemente alto como para mantener una fuerte estratificación en la densidad del agua (Geyer & Ralston, 2011; Ibañez et al, 1997).

Las características geométricas de la cuña salina están influenciadas principalmente por la descarga fluvial. En general, a mayor descarga fluvial, menor longitud de la cuña, pudiendo, incluso, llegar a ser expulsada del sistema. El umbral en la descarga fluvial (o gasto crítico) que define la presencia o ausencia de la cuña salina, a menudo está relacionado con la descarga fluvial promedio, como fue

reportado en los ríos Ebro (Ibañez et al, 1997), Po (Nelson, 1970) y Jamapa (Perales-Valdivia et al., 2018). La variación del nivel del mar y el esfuerzo del viento se consideran forzamientos secundarios en la dinámica de la intrusión salina. Bajo condiciones estables de descarga fluvial, calma y elevación del nivel del mar, la posición y geometría de la cuña salina se vuelve prácticamente invariante en el tiempo (Geyer & Ralston, 2011).

1.2. La problemática ambiental en los estuarios de micromarea de cuña salada

Los estuarios son sistemas gobernados por los fenómenos físicos y se presentan amplias variaciones espaciales y temporales en las condiciones ambientales, lo que genera que sean ecosistemas muy estresados. Al estrés natural, se suma el ocasionado por las múltiples actividades humanas que se desarrollan en ellos y en sus vecindades (Kennish, 2000).

De acuerdo a Warwick et al. (2018), considerando los tiempos de residencia del agua en estos sistemas, los estuarios micromareales de cuña salina son más susceptibles a los impactos antropogénicos, en comparación con los estuarios macromareales. Esta susceptibilidad es particularmente más notoria durante la época de bajas descargas fluviales. La fuerte estratificación del agua (factor que inhibe la mezcla en la vertical) y los altos tiempos de residencia observados en estuarios micromareales, facilitan la acumulación de materiales disueltos y en suspensión, como contaminantes, nutrientes y materia orgánica, lo que puede facilitar los florecimientos algales, procesos de eutricación, así como eventos de hipoxia (baja) y anoxia (nula concentración de oxígeno disuelto en el agua) en la capa de fondo.

1.3. Programas de monitoreo en estuarios micromareales de cuña salina

Dado que cada sistema estuarino posee características (físicas, de forzamientos, y morfológicas) únicas, y cada sistema está expuesto a diferentes actividades antropogénicas, el diseño de los programas de monitoreo es específico para cada uno de ellos.

El punto de partida para el diseño de cualquier programa de monitoreo es establecer los objetivos del mismo de manera clara y explícita. Una vez establecidos, se deberán considerar las características únicas del estuario, su problemática ambiental, así como el costo-beneficio en la generación de la información (Gonenc & Wolflin, 2004). También deberán definirse las variables a medir, y la resolución espacial y temporal requerida.

Independientemente de las especificaciones de cada programa de monitoreo ambiental en estuarios, estos incluyen mediciones de parámetros hidrodinámicos, donde se contemplan generalmente: (i) flujo, temperatura y salinidad en la entrada del estuario y en puntos dentro del sistema, (ii) descarga de aguas fluviales, (iii) variación del nivel del mar en la entrada del estuario y puntos dentro del sistema, (iv) altura de ola significativa y (v) esfuerzo del viento (Gonenc & Wolflin, 2004).

En específico para los estuarios de cuña salina de ambientes micromareales se deberá considerar el monitoreo a lo largo de la intrusión salina. La frecuencia de muestreo deberá garantizar una adecuada resolución de la variación temporal de la descarga fluvial.

2. Caso de estudio: El Jamapa

2.1. Descripción

La cuenca del río Jamapa se localiza entre los 18°45' y 19°14' latitud norte, y entre 95°56' y 97°17' longitud oeste (Comisión Nacional del Agua, Conagua, 2005). Tiene un área aproximada de 3,929 km². Está compuesto por dos corrientes principales, el río Cotaxtla y el río Jamapa, lo cuales confluyen antes de desembocar en el Golfo de México, como río Jamapa. A lo largo de su recorrido, las aguas cruzan diversos terrenos de cultivo. Cercano a la desembocadura, el río Jamapa tiene conexión con el arroyo Moreno y la Laguna de Mandinga. (**Figura 1**). El río Jamapa desemboca (19° 6' 10.8" N, 96° 5' 52.8" O) en una bahía limitada al norte y al sur por arrecifes coralinos, mismos que conforman la reserva ecológica Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano (PNSAV).

El gasto del río Jamapa exhibe alta variabilidad temporal y baja descarga anual. Se estima que la descarga promedia 66 m³s⁻¹, y exhibe un comportamiento bimodal, con un periodo de altas descargas durante los meses de primavera-verano, que promedia 150 m³s⁻¹; y un periodo de bajas descargas durante los meses de otoño-invierno, que promedia 20 m³s⁻¹ (Perales-Valdivia et al., 2018; Riverón-Enzástiga, 2008). El rango (< 1 m) de marea y el número de forma (3.39) observados en la plataforma continental adyacente a la desembocadura del río Jamapa, definen a esta zona como un ambiente micromareal con marea mixta de predominancia diurna. Lo que propicia la formación de estuarios de cuña salina en la parte baja de los ríos.

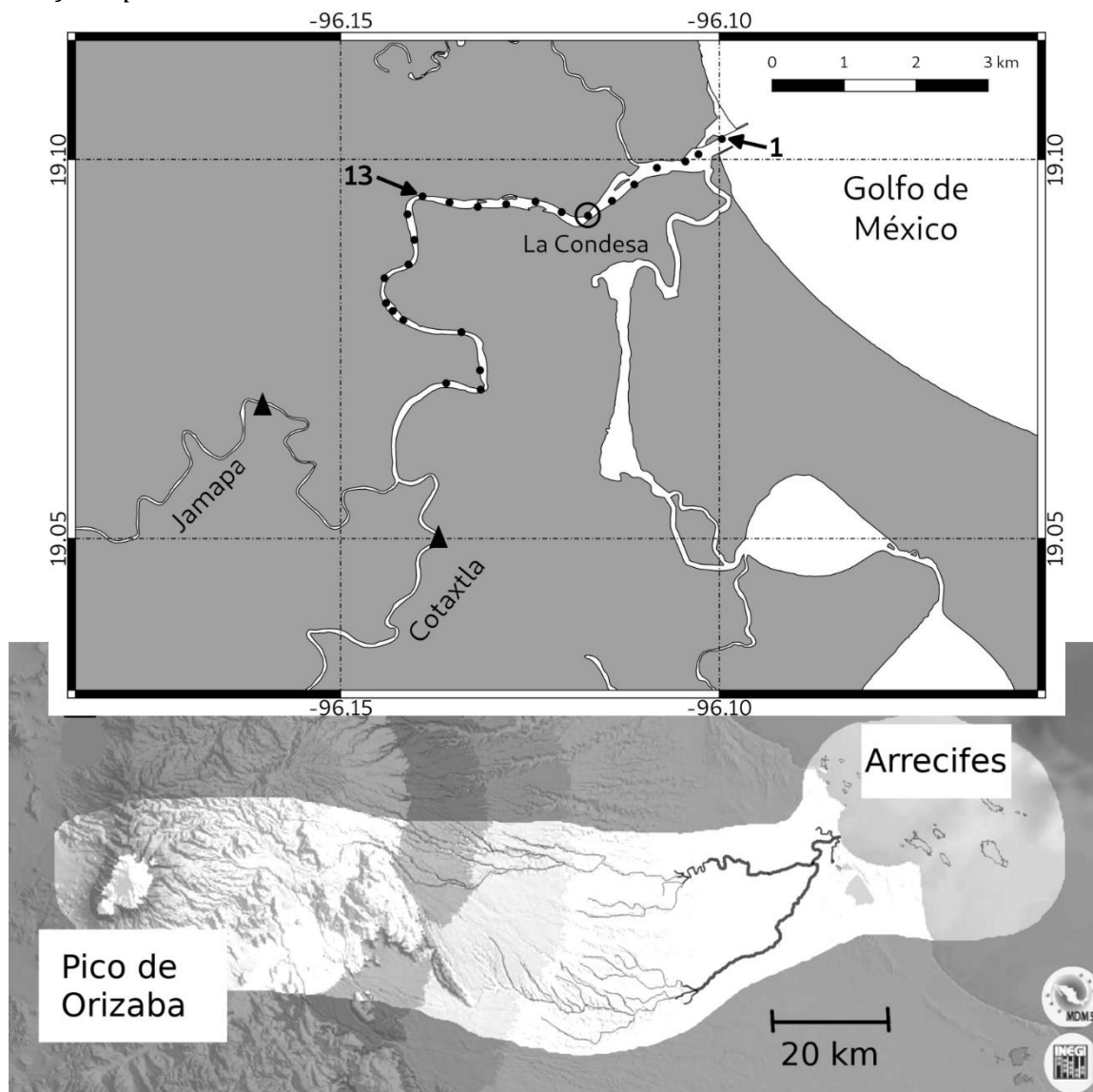
De acuerdo a Mateos-Jasso et al (2012), el esfuerzo del viento sobre la plataforma continental frente a Boca del Río muestra dos épocas distintivas, una que va de septiembre a marzo con vientos dominantes del nor-noroeste, cuya magnitud son del orden de 10 ms⁻¹, y el otro de abril a agosto, donde la magnitud comúnmente observada es de 2-3 ms⁻¹ y no se marca una dirección reinante. Vázquez-Alcocer (2020) reporta que la altura ola significativa (Hs) frente al puerto de Veracruz oscila entre 1 y 2 m, donde las olas provenientes del norte son las de mayor magnitud. Durante eventos extremos como arribo de huracanes o eventos de norte, Hs supera los 6 m.

2.2. La problemática del río Jamapa

Diferentes estudios han exhibido, o sugerido, la contaminación de la parte baja del río Jamapa por compuestos químicos como metales pesados y organoclorados (Palomares-García, 2010; Lango-Reynoso et al., 2013; Zamudio-Alemán et al., 2014; Castañeda-Chávez et al., 2020) y contaminación microbiológica (Palomares, 2010; Torres-Beristáin et al., 2013). Lo anterior como consecuencia del uso de fertilizantes, plaguicidas y fungicidas en las zonas agrícolas localizadas en la cuenca, así como por actividad industrial y múltiples asentamientos humanos que descargan los efluentes de aguas residuales y domésticas a los diferentes tributarios.

Los metales pesados han sido identificados en bioacumulaciones en organismos bentónicos (Lango-Reynoso et al., 2013), así como en sedimentos (Zamudio-Alemán et al., 2014) y en el agua del río Jamapa (Castañeda-Chávez et al., 2020) y sus tributarios como río seco, arroyo Moreno (Palomares-García, 2010) y Laguna de Mandinga (Lango-Reynoso et al., 2013). La contaminación por metales pesados y microbiana se asocia tanto a fuentes puntuales como descargas de aguas domésticas (Torres et al., 2013), actividades de acuacultura (Palomares-García, 2010), así como fuentes no puntuales derivados del cambio del uso de suelo. Se ha documentado también contaminación por exceso de nutrientes y materia orgánica, lo que deriva en procesos de eutricación (Torres et al., 2013).

Figura 1
 Río Jamapa



Nota: Los puntos negros a lo largo del cauce del río indican la posición de las estaciones hidrográficas utilizadas en el monitoreo hidrográfico a corto plazo
 Fuente: Elaboración propia.

2.3. Estudios hidrográficos en la parte baja del río Jamapa

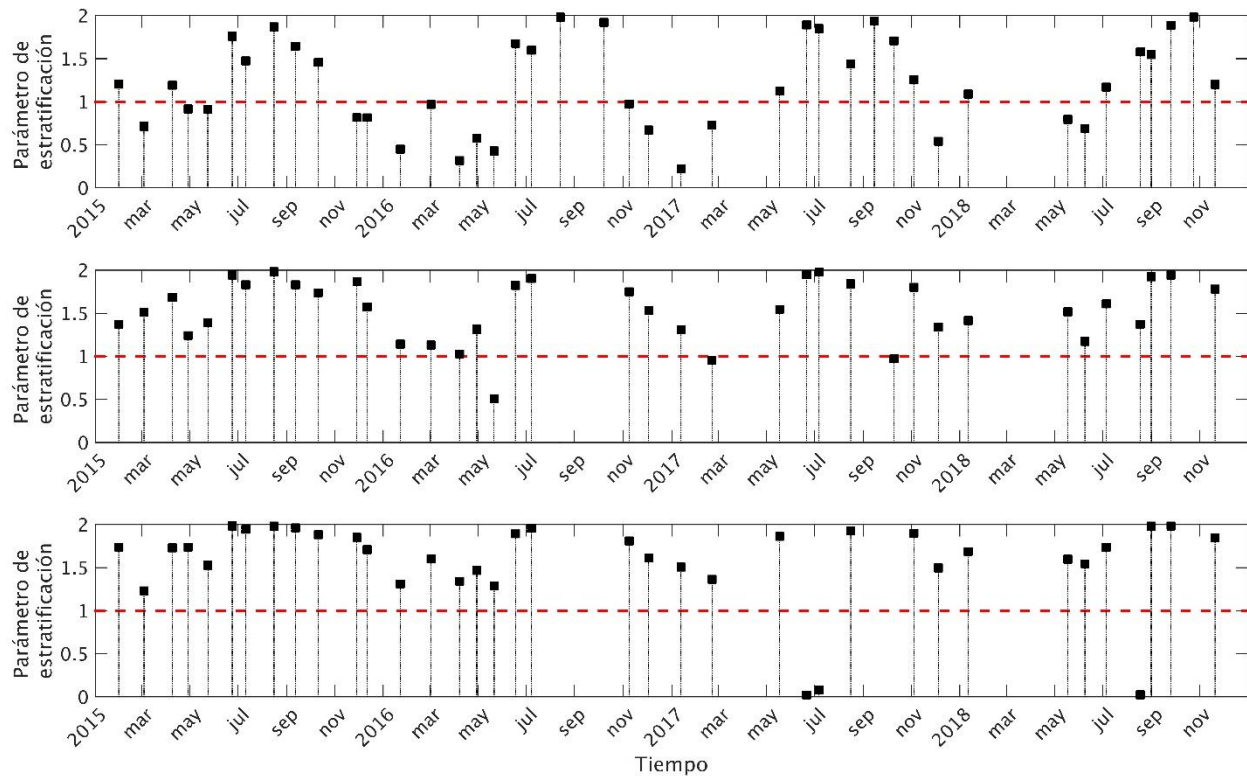
En 2010 y 2011 se condujeron tres muestreos hidrográficos intensivos en la parte baja del río Jamapa. Cada muestreo tuvo una duración de 24 horas. A lo largo de cada muestreo se realizaron lances hidrográficos en 14 estaciones predeterminadas, las cuales se ubicaron a lo largo del cauce del río, y fueron visitadas cada 1.5 hr–2 hr. La separación de las estaciones era de 400 m aproximadamente.

Los principales aportaciones de este estudio pueden resumirse como: (1) Se exhibió que el río Jamapa se comporta como un estuario de cuña salina, (2) La longitud de la intrusión salina es modulada principalmente por la descarga fluvial, (3) El gasto crítico para la presencia/ausencia de la intrusión salina es cercano al gasto promedio anual, (4) Los efectos de la marea sobre la posición de la cuña de sal fueron evidentes solo en condiciones de no-viento, para mayor detalle de las campañas de muestreo y resultados, consultar Perales-Valdivia et al. (2018).

Una vez identificado al estuario como un sistema de cuña salina micromareal, donde la descarga fluvial es el principal forzamiento que gobierna la intrusión salina, se planteó un programa de monitoreo hidrográfico de corto plazo. El programa contemplaba la colección de datos hidrográficos a lo largo de la cuña salina, con una resolución temporal mensual, y duración de al menos 5 años, esto con la intención de detallar las características de la cuña salina y la estratificación de la columna de agua bajo diferentes condiciones de descargas fluviales. Solo durante el primer año del monitoreo (marzo 2015 a febrero 2016) fue posible coleccionar datos cada mes. Y aunque la colecta de datos siguió hasta marzo de 2020, éstos no tienen una resolución temporal uniforme.

El monitoreo consistió en lances hidrográficos en estaciones ubicadas cada 400 m aproximadamente a lo largo del cauce y hasta donde se registraba la intrusión salina. La primera estación hidrográfica visitada durante cada muestreo fue la estación más cercana a la desembocadura, nombrada JMP01. El número total de estaciones hidrográficas muestreadas fue variable, ya que la longitud de la cuña salina varió con la estacionalidad de la descarga fluvial. Los lances hidrográficos fueron realizados con un perfilador marca y modelo YSI-CastAway. La ubicación de las estaciones se hizo con un geoposicionador satelital (GPS).

Figura 2
Series de tiempo del paraámetro de estratificación para tres puntos del estuario



Nota: Series de tiempo del parámetro de estratificación para tres puntos del estuario para tres puntos del estuario, bocana (panel superior), en la vecindad de la desembocadura de arroyo Moreno (panel central) y Condesa (panel inferior).

Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 2** se muestran series de tiempo del parámetro de estratificación, que representa la estratificación global de la columna de agua, evaluada como: $Sp = (S_{fondo} - S_{sup}) / [0.5 (S_{fondo} + S_{sup})]$. Donde S_{fondo} y S_{sup} son la salinidad en el fondo y en la superficie de la columna de agua, respectivamente. Para valores de $Sp > 1.0$, se considera característica de una cuña salina (Haralambidou et al., 2010).

En la **Figura 2** se presentan series de tiempo de Sp de tres estaciones hidrográficas, cerca de la bocana (panel superior), cerca de la desembocadura de arroyo Moreno (panel central) y en la estación la condesa (panel inferior). Los gráficos exhiben al estuario de desembocadura de río Jamapa como un sistema fuertemente estratificado, donde Sp muestra variación anual, y espacial.

Referencias

- Aguilera-Arilla, M. J.** y Borderías-Uribeondo, M. P. & González Yanci, M. P. (2010). Geografía general II: geografía humana.. UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia. <https://elibro.net/en/lc/bibliotecauv/titulos/147927>
- Behmel, S.,** Damour, M., Ludwig, R., & Rodriguez, M. J. (2016). Water quality monitoring strategies— A review and future perspectives. *Science of the Total Environment*, 571, 1312-1329.
- Cameron, W. M.** y Pritchard, D. W. (1963). Estuaries. In Hill, M. N (ed.), *The Sea*, Vol. 2. John Wiley & Sons, New York, 306–324.
- Castañeda-Chávez, MDR.,** Lango-Reynoso, F., & Navarrete-Rodríguez, G. (2020). Study on Contamination by Heavy Metals in the Cotaxtla-Jamapa Basin with Influence in the Central Zone of the Gulf of Mexico. *Water, Air, & Soil Pollution*, 231(3), 1-13.
- Geyer, W. R.,** & Ralston, D. K. (2011). 2.03-The dynamics of strongly stratified estuaries. *Treatise on Estuarine and Coastal Science*. Amsterdam: Elsevier, 37-52.
- Gonenc, I. E.,** & Wolflin, J. P. (Eds.). (2004). *Coastal lagoons: ecosystem processes and modeling for sustainable use and development*. CRC Press.
- Gray, W. B.** & Shimshack, J. P. (2011). The Effectiveness of Environmental Monitoring and Enforcement: A Review of the Empirical Evidence, *Review of Environmental Economics and Policy, Association of Environmental and Resource Economists*, 5(1), 3-24.
- Haralambidou, K.,** Sylaios, G., & Tsihrintzis, V. A. (2010). Salt-wedge propagation in a Mediterranean micro-tidal river mouth. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 90(4), 174-184.
- Ibañez, C.,** Pont, D., & Prat, N. (1997). Characterization of the Ebre and Rhone estuaries: A basis for defining and classifying salt-wedge estuaries. *Limnology and Oceanography*, 42(1), 89-101.
- Kennish, M.J.** (ed.), 2000. *Estuary Restoration and Maintenance: The National Estuary Program*. Boca Raton: CRC Press.
- Lango-Reynoso, F.,** Castañeda-Chávez, M. D. R., Landeros-Sánchez, C., Galavíz-Villa, I., Navarrete-Rodríguez, G., & Soto-Estrada, A. (2013). Cd, Cu, Hg and Pb, and organochlorine pesticides in commercially important benthic organism's coastal lagoons SW Gulf of Mexico. *Agricultural Science*, 1(1), 63-79.
- Mateos-Jasso, A.,** Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno, R., & Allende-Arandía, M. E., 2012. Variability of the thermohaline structure in the northern Veracruz Coral Reef System, Mexico. *Continental Shelf Research*, 50, 30-40.
- Nelson, B. W.** (1970). Hydrography, sediment dispersal and recent historical development of the Po river delta, Italy: in J. P Morgan and RH Shaver, eds., *Deltaic Sedimentation Modern and Ancient: SEP M. Spec. Publ*, 15, 152-184.
- Palomares-García J.M.**(2010). Valoración de la calidad de los influentes y efluentes de las ganjas acuícolas de la Cuenca Baja del Río Jamapa, Veracruz. Tesis doctoral. Colegio de postgraduados. Institución de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas. Tepetates, Manlio Fabio Altamirano, Veracruz.
- Perales-Valdivia, H.,** Sanay-González, R., & Valle-Levinson, A. (2018). Effects of tides, wind and river discharge on the salt intrusion in a microtidal tropical estuary. *Regional Studies in Marine Science*, 24, 400-410.
- Potter, I. C.,** Warwick, R. M., Hall, N. G., & Tweedley, J. R. (2015). The physico-chemical characteristics, biota and fisheries of estuaries. *Freshwater fisheries ecology*, 48-79.

- Riverón-Enzástiga**, M.L., (2008). *Análisis de la variabilidad de las descargas de agua de los principales ríos del sur de la cuenca hidrológica del Golfo de México. Ciudad de México. Tesis. UNAM.*
- Schelske**, C. L., y Odum, E. P. (1962). *Mechanisms maintaining high productivity in Georgia estuaries.*
- Sierra**, J. P., Sánchez-Arcilla, A., Del Río, J. G., Flos, J., Movellán, E., Mösson, C., & Romero, I. (2002). Spatial distribution of nutrients in the Ebro estuary and plume. *Continental Shelf Research*, 22(2), 361-378.
- Torres-Beristáin**, B., González López, G., Rustrián Portilla, E., & Houbron, E. (2013). Enfoque de cuenca para la identificación de fuentes de contaminación y evaluación de la calidad de un río, Veracruz, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 29(3), 135-146.
- Valle-Levinson**, A. (2010). Definition and classification of estuaries. *Contemporary issues in estuarine physics*, 1, 1-10.
- Vázquez-Alcocer**, M.(2020). *Determinación y Caracterización del Clima Marítimo Extremo e Inundación Costera por Rebase de Oleaje en el Puerto de Veracruz, Veracruz [tesis licenciatura].* Universidad de Guanajuato. División de Ingenierías. Campus Guanajuato, México.
- Warwick**, R. M., Tweedley, J. R., & Potter, I. C. (2018). Microtidal estuaries warrant special management measures that recognise their critical vulnerability to pollution and climate change. *Marine pollution bulletin*, 135, 41-46.
- Worm**, B., Barbier, E. B., Beaumont, N., Duffy, J. E., Folke, C., Halpern, B. S., & Watson, R. (2006). Impacts of biodiversity loss on ocean ecosystem services. *Science*, 314(5800), 787-790.
- Zamudio-Alemán**, R. E., Castañeda-Chávez, M. D. R., Lango-Reynoso, F., Galaviz-Villa, I., Amaro-Espejo, I. A., & Romero-González, L. (2014). Metales pesados en sedimento marino del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano. *Rev. Iberoam. Cienc*, 1(4), 159-168.