

RELACIÓN ENTRE GRANULOMETRÍA Y MATERIA ORGÁNICA EN SEDIMENTOS MARINOS DE VERACRUZ

Marimar Lara Acosta¹, Maria del Refugio Castañeda-Chávez*, Angel Ruiz Sanchez², Fabiola Lango Reynoso¹, Isabel A. Amaro-Espejo¹, Jesús Montoya Mendoza¹, David Reynier Valdes¹.

¹Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Boca del Río, Km 12 Carretera Veracruz-Córdoba C.P. 94290 Boca del Río, Ver., México.

²Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, Ciudad de México. C.P. 04510

d24990450@bdelrio.tecnm.mx, mariacastaneda@bdelrio.tecnm.mx, angelrs@quimica.unam.mx, fabiolalango@bdelrio.tecnm.mx, isabelamaro@bdelrio.tecnm.mx, jesusmontoya@bdelrio.tecnm.mx, davidreynier@bdelrio.tecnm.mx

Autor de correspondencia: mariacastaneda@bdelrio.tecnm.mx

Resumen - Los sedimentos marinos desempeñan un papel fundamental en los ecosistemas costeros, ya que funcionan como sustrato para los organismos y como reservorios de materia orgánica. En zonas portuarias, la dinámica de los sedimentos puede verse modificada tanto por procesos naturales como por actividades antropogénicas, afectando la distribución granulométrica y el contenido de materia orgánica. En este contexto, el objetivo del presente estudio fue analizar la relación entre la granulometría y la materia orgánica en sedimentos marinos de tres zonas adyacentes al Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano (PNSAV), bajo la influencia del Puerto de Veracruz. Se realizó un análisis granulométrico y la determinación del contenido de materia orgánica en sedimentos de fondo. Los resultados mostraron una textura mixta en las zonas I y II, asociada a condiciones de alta energía y tráfico marítimo; sin embargo, en las tres zonas predominó la fracción de lodos muy finos. Los contenidos de materia orgánica oscilaron entre $1.28 \pm 0.39\%$ y $1.67 \pm 0.48\%$, valores considerados bajos a moderados para ambientes marinos costeros. Asimismo, no se identificó una correlación entre la proporción de partículas muy finas y el contenido de materia orgánica. Estos resultados aportan información relevante para la evaluación ambiental y la gestión del área de influencia portuaria y del PNSAV.

Índice de Términos - Sedimentos, granulometría, textura, materia orgánica.

1. INTRODUCCIÓN

Los sedimentos constituyen un componente fundamental de los ecosistemas marinos y costeros, ya que proporcionan el sustrato y el medio de soporte para una amplia diversidad de organismos acuáticos. Además, son biogeoquímicamente activos, pues pueden transportar y retener sustancias orgánicas e inorgánicas adheridas a sus superficies, al tiempo que ofrecen una amplia área superficial que favorece la abundancia y actividad de comunidades microbianas [1]. No obstante, la

movilización y la calidad de los sedimentos en los ecosistemas marinos se ven parcialmente afectadas por acciones antropogénicas[2], así como por dinámicas naturales como el oleaje, las corrientes y los vientos, que influyen en el transporte de arenas y en la formación de depósitos sedimentarios[3]. Numerosos ríos transportan grandes cantidades de sedimentos que contienen a zonas costeras. Cuando los sedimentos ingresan a las aguas costeras desde los ríos, los sedimentos gruesos tienden a depositarse cerca de las regiones costeras, mientras que las partículas más finas se depositan más lejos en el océano[4].

En zonas portuarias de Veracruz, adyacentes al Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano (PNSAV), ecosistema altamente complejo, diverso y productivo, cuyos recursos proveen una amplia gama de bienes y servicios ecosistémicos declarado como Área Natural Protegida (ANP)[5]. El aporte de sedimentos está influenciado tanto por fuentes naturales como por descargas fluviales por los ríos Jamapa, Papaloapan y Antigua[6], además de diversos desechos asociados a las actividades humanas. Entre los principales factores que inciden en la dinámica sedimentaria se encuentran el tráfico marítimo, el fondeo de embarcaciones provenientes de distintos países, la sobrepesca, las actividades energéticas y petroleras, así como los trabajos de dragado y perforación del fondo marino y el continuo desarrollo turístico[7]. Esto aunado a la falta de una política costera, discreción en la aplicación de la normativa vigente y la falta de capacidad institucional, ha resultado en una creciente degradación del ecosistema[8].

Asimismo, la reciente ampliación del Puerto de Veracruz ha intensificado las actividades económicas y el arribo de embarcaciones[9], lo que permite el transporte de un gigantesco volumen de carga que forman para el adecuado funcionamiento de las economías[10], [11]. Teniendo efecto sobre la hidrodinámica de los sedimentos en la zona, lo puede llevar a distribuciones de tamaño de grano alteradas [12].

La granulométrica de los sedimentos está estrechamente relacionada con las condiciones energéticas del ambiente. En general, los granos más gruesos se asocian a entornos de alta

energía, como zonas expuestas al oleaje y áreas afectadas por eventos de tormenta, mientras que los sedimentos más finos tienden a acumularse en ambientes costeros protegidos o de baja energía [13].

Para comprender el comportamiento de los sedimentos en sistemas costeros, especialmente en entornos tropicales de alta energía, sujetos a un intenso forzamiento hidrodinámico que remodela continuamente la línea de costa y regula el transporte, la deposición y la clasificación de sedimentos [13]. El análisis granulométrico de tamaño de grano sigue siendo uno de los indicadores indirectos más utilizados para reconstruir entornos deposicionales e inferir las condiciones energéticas, el suministro de sedimentos y los mecanismos de transporte en entornos costeros [14].

Por su parte, la materia orgánica contenida en los sedimentos cumple un papel clave como fuente de alimento para los ecosistemas bentónicos, influyendo significativamente en la distribución y estructura de estas comunidades [15]. Además, constituye un indicador fundamental del funcionamiento del sistema, ya que está vinculada a la productividad primaria, al aporte continental y a los procesos de degradación y preservación orgánica [16].

Diversos estudios han demostrado la existencia de una estrecha relación entre la granulometría del sedimento y el contenido de materia orgánica, dado que las partículas finas presentan una mayor área superficial y capacidad de retención de compuestos orgánicos, lo que incrementa la estabilidad y permanencia de la materia orgánica en sedimentos de menor tamaño de partícula [17]. En este contexto tanto en la zona portuaria de Veracruz como el PNSAV esta relación adquiere importancia debido a que las fracciones finas también tienden a concentrar contaminantes asociados, como metales pesados, lo que puede tener implicaciones ecológicas para los arrecifes y comunidades bentónicas [18].

Por lo anterior, el análisis integrado de la granulometría, y la materia orgánica en sedimentos marinos constituye una herramienta clave para la evaluación ambiental de la zona de influencia portuaria y el PNSAV permitiendo identificar áreas de acumulación de sedimentos de partículas gruesas y finas, interpretar las condiciones hidrodinámicas dominantes y generar información útil para la gestión y conservación de este ecosistema marino.

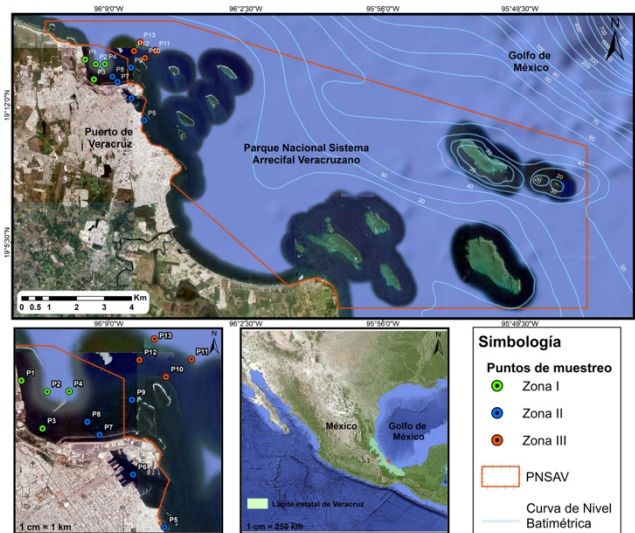
II. METODOLOGÍA

Descripción del área de estudio

El área de estudio comprende una extensión de 78.63 km² aproximadamente, de la zona costera adyacente al Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano (PNSAV) (**Figura 1**). El PNSAV es un área micromareal (< 45 m) (< 2 m) somera (< 45 m), la cual cuenta con 50 plataformas y arrecifes costeros, ubicada en la plataforma continental de la región suroeste del Golfo de México, frente a las costas de Veracruz, México [19]. El clima en la zona costera corresponde a la categoría cálido-húmedo, el cual se caracteriza por presentar varias temporadas de eventos climáticos; secas, lluvias y nortes. Las aguas que lo rodean son especialmente; oceánicas, costeras y de mezclas [9].

1. Colecta de las muestras

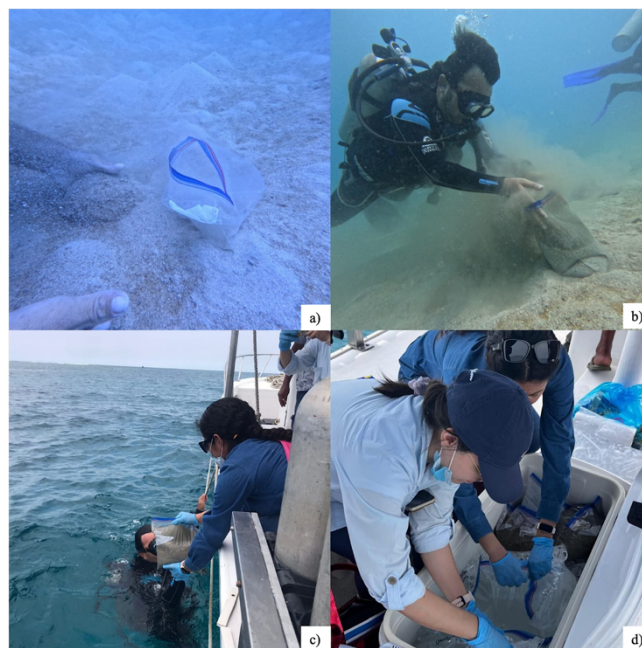
El muestreo se realizó durante la época de nortes, en el mes de diciembre 2024. Considerando las zonas de sospecha de amenaza de degradación. Se establecieron 13 puntos de muestreo divididos en tres zonas: Zona I (puerto norte, cercano a los arrecifes punta brava y punta gorda), Zona II (puerto sur,



cercano a los arrecifes gallega, hornos y mersey) y Zona III (area alejada del puerto vertederos, cercanos a los arrecifes galleguilla y blanquilla).

Figura 1. Área de estudio adyacente al PNSAV, zonas y puntos de muestreo. Elaboración propia.

Por cada punto de muestreo se recolectaron 500g de muestras de sedimento marino mediante buceo scuba colocandolas en bolsas de polietileno con sellado hermetico. Las muestras se transportaron al laboratorio de investigación y recursos



acuáticos (LIRA) del Instituto Tecnológico de Boca del Río

Figura 2. Muestreo de sedimento marino, a) bolsa de polietileno en área de muestreo, b) muestreo scuba, c) preservación de las muestras en hieleras.

(ITBOCA) a una temperatura de $\pm 4^{\circ}\text{C}$. Se preservaron en el laboratorio a temperatura de congelación hasta su análisis (Figura 2).

2. Análisis de laboratorio

a) Secado

Las muestras de sedimento se descongelaron y se colocaron en bandejas de aluminio, aproximadamente 200g de cada una y se secaron al aire libre por 48 h.

b) Determinación Granulométrica

El análisis granulométrico y la determinación de la textura del suelo se realizó de acuerdo con los métodos AS-28 y AS-09 establecidos en la NOM-021-SEMARNAT-2000, la cual se basa en la ley de Stokes.

Como pretratamiento se pesaron 100g de muestra seca y se transfirieron a un vaso de precipitado. Para la dispersión de los agregados, se adicionaron 20 ml de solución de hexametáfosfato de sodio y se homogeneizó la suspensión por 10 min. Para la remoción de la materia orgánica, se añadieron 10ml de peróxido de hidrógeno al 30%, se completó con agua destilada y se cubrió el recipiente, dejando la suspensión en reposo por 24 h.

Transcurrido este tiempo, se retiró la capa superficial (nata) generada por la oxidación. Para cuantificación de fracciones finas, la muestra tratada fue transferida a una probeta graduada de 1L y aforada con agua destilada hasta el volumen total. Para cuantificar las fracciones de limo y arcilla, se empleó el método de la pipeta, tomando alícuotas con una pipeta de 25 ml a profundidades específicas (5, 10 y 20 cm) en tiempos calculados según un cuadro de valores de sedimentación (Tabla 1). Las alícuotas obtenidas se depositaron en crisoles de peso constante y se secaron en un horno a 60°C por 24h para determinar su masa gravimétricamente.

Tabla 1. Cuadro de valores de sedimentación.

Partícula	Profundidad (cm)	Tiempos de extracción respecto a la temperatura (hrs:min:seg)		
		22°	23°	24°
Arenas	20	0:00:20	0:00:20	0:00:20
Limos	10	0:01:49	0:01:46	0:01:44
Arcillas	5	3:52:00	3:46:00	3:41:00

Para cuantificación de fracciones gruesas, el material restante en la probeta (fracción arena) fue tamizado en húmedo utilizando un tamiz de $63\ \mu\text{m}$ y lavado con agua de grifo para separar completamente las partículas finas. El residuo retenido en el tamiz fue llevado al horno a 60°C hasta sequedad total. Una vez seca, la fracción arena se colocó en una cama de tamices con aberturas de 2000, 900, 500, y $63\ \mu\text{m}$.

El conjunto fue sometido a agitación en un equipo Ro-tap por 15 minutos. Finalmente se se registraron los pesos obtenidos de los crisoles (fracciones finas) y los pesos retenidos en cada

tamiz (fracción gruesa). Los datos fueron posteriormente procesados e ingresados en el software Gradistat v9.1 para determinar las clases texturales y los parámetros estadísticos de la granulometría.

c) Determinación de la materia orgánica

La determinación del contenido de materia orgánica se realizó mediante el método químico de Walkley y Black, de acuerdo con lo establecido en la NOM-021-SEMARNAT-2000 (AS-07).

Las muestras secas, se homogeneizaron y tamizaron a través de una malla de 0.5 mm. Posteriormente, se pesaron 5 g de muestra y se transfirieron a un matraz Erlenmeyer.

A cada muestra se le adicionaron 10 mL de dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) 1 N y 20 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado, dejando reposar la suspensión durante 30 minutos para asegurar la oxidación de la materia orgánica. La reacción se detuvo mediante la adición de 200 mL de agua destilada y 5 mL de ácido fosfórico (H_3PO_4) concentrado, seguida de 10 gotas del indicador de difenilamina.

El exceso de dicromato de potasio no reaccionado se tituló inmediatamente con una solución de sulfato ferroso amónico 1.0 M, hasta observar el cambio de color de verde azulado a verde esmeralda brillante. De forma paralela, se realizó un blanco (sin muestra) para la estandarización de la solución titulante. El porcentaje de materia orgánica se calculó a partir del contenido de carbono orgánico, considerando el factor de Van Bemmelen (1.724)

$$\% \text{ Materia orgánica} = \% \text{ C Orgánico} \times 1.724$$

3. Análisis estadístico

Para evaluar las diferencias significativas en las fracciones granulométricas: gravas, arenas y finos; y materia orgánica entre los diferentes zonas de muestreo, se aplicó un análisis de varianza no paramétrico de Kruskal-Wallis. Adicionalmente, se ejecutó un análisis de correlación de Spearman (ρ) para determinar la existencia y la fuerza de las relaciones monotónicas entre las fracciones granulométricas y el contenido de materia orgánica. La significancia estadística para las pruebas se estableció en un nivel de confianza del 95% ($\alpha = 0.05$)

III.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las características texturales y granulométricas de los sedimentos depende de la morfodinámica de la cuenca y de su relación con las fuentes de aporte, distancia de movilización y composición de los flujos sedimentarios[20].

Zona I : Esta zona presentó una textura mixta dominada por las partículas finas. El punto P1 se clasificó como Grava, representando el 25% de la zona, los puntos restantes (P2, P3 y P4) se clasificaron como lodos muy finos, constituyendo el 75% del total muestreado en esta área.

Zona II: Se observó un patrón textural similar al de la Zona I. El punto P9 se clasificó como Grava, representando el 20% de

la zona muestreada. Los puntos restantes (P5, P6, P7 y P8) fueron clasificados como lodos muy finos, constituyendo el 80% del área. Es notable que la fracción de grava experimentó una ligera disminución respecto a la Zona I.

Zona III: Esta zona mostró la mayor homogeneidad y finura textural. No se registró presencia de Grava en ninguno de los puntos. Los lodos muy finos predominaron totalmente, abarcando el 100% de los puntos muestreados (P10, P11, P12 y P13) **Figura 3.**

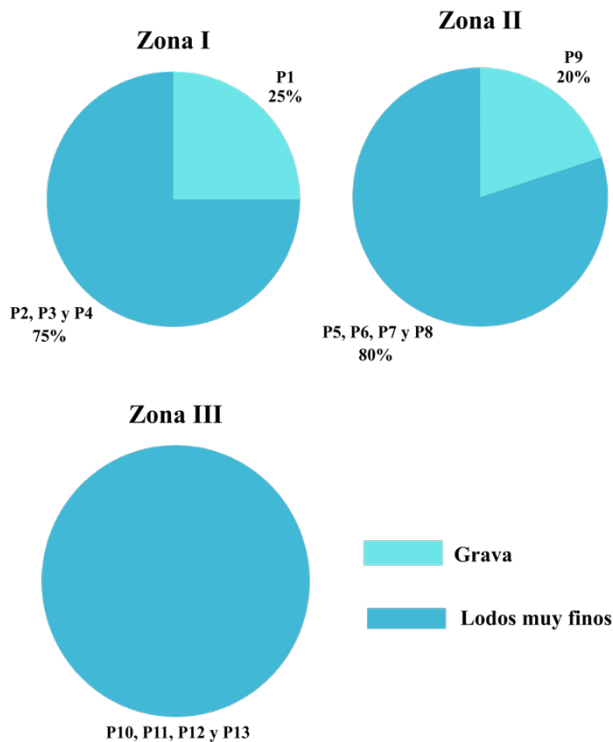


Figura 3. Clasificación textural de las tres zonas muestreadas.

La presencia de partículas de sedimento grueso como la grava generalmente indica proximidad a la fuente de sedimento, un entorno de transporte de alta energía o que se encuentra bajo la influencia directa de procesos dinámicos intensos [12]. Esto puede ser resultado de la proximidad al acceso principal del puerto, la acción de las olas en rompeolas, la turbulencia generada por el tráfico constante de grandes embarcaciones y las recurrentes actividades de dragado asociadas a la expansión del nuevo puerto de Veracruz [3]. Sin embargo su proximidad e interacción con el PNSAV también permite el aporte de la fracción gruesa, pudiendo ser un conjunto de origen terrestre y biogénico (fragmentos de corales, algas calcáreas y conchas) [21].

Por su parte la predominancia de lodos muy finos en las tres zonas, sugiere que existencia entornos costeros protegidos o de baja energía permitiendo la sedimentación de lodos finos [13]. Esta condición es coherente con la hidrodinámica del PNSAV, donde las crestas arrecifales externas actúan como barreras naturales que atenúan el oleaje y las corrientes provenientes del Golfo de México[9]. Como resultado, las áreas ubicadas tierra adentro y en zonas portuarias próximas al PNSAV funcionan

como cuencas de depósito, favoreciendo la acumulación de partículas finas (limo y arcilla) y la retención de materia orgánica y metales asociados[22]. La presencia de estos lodos muy finos, por tanto, refleja la interacción entre la estructura arrecifal y los procesos de sedimentación en el entorno portuario de Veracruz.

Los contenidos de materia orgánica presentaron valores para la zona I, zona II y zona III de 1.28 , 1.45 y 1.67 % respectivamnete , lo que corresponde a niveles bajos a moderados típicos de sedimentos costeros de energía moderada **Tabla 2.** En general los niveles de materia organica son moderados >2%, esto se puede explicar por que los sedimentos arrecifales tienen altas tasas de resuspensión y taransporte debido a la hidrodinamica [23].

Ya que los sedimentos costeros reciben un aporte continuo de materia orgánica proveniente tanto de la productividad primaria marina como de descargas fluviales y residuos asociados a actividades humanas, como el tráfico marítimo y descargas urbanas [24]. Por lo que estos niveles moderados de materia orgánica detectados reflejan el aporte de material orgánico, por influencia antropogenica, pero tambien la capacidad de la zona en los procesos de degradación y preservación en un ambiente

La prueba de **Kruskal–Wallis** aplicada a las fracciones granulométricas (grava, arena y finos) y materia orgánica no mostró diferencias estadísticamente significativas entre las zonas de estudio ($p > 0.05$).

Estos resultados indican que, a escala espacial, la composición granulométrica del sedimento presentan un comportamiento homogéneo entre las zonas evaluadas donde predominan los granos finos , lo cual puede estar asociado a procesos de transporte, depósito y mezcla de sedimentos relativamente uniformes en el sistema **Tabla 2.**

Tabla 2. Granulometría y materia orgánica en (%)

Zonas	Grava	Arena	Finos	Materia orgánica
I	23.72±47.43 ^a	1.13±2.13 ^a	74.98±49.67 ^a	1.45±0.36 ^a
II	19.57±43.77 ^a	1.05±2.10 ^a	79.88±44.51 ^a	1.28±0.39 ^a
III	0.58±1.16 ^a	0.81±1.54 ^a	98.74±2.92 ^a	1.67±0.48 ^a

El análisis de **correlación de Spearman** reveló una asociación positiva fuerte y significativa entre la fracción de grava y arena ($\rho = 0.74$, $p < 0.05$), así como correlaciones negativas significativas entre grava y finos ($\rho = -0.74$, $p < 0.05$) y entre arena y finos ($\rho = -0.70$, $p < 0.05$). La materia orgánica presentó una correlación negativa moderada y significativa con la fracción de grava ($\rho = -0.59$, $p < 0.05$), por lo que los puntos donde hay deominancia en grava se limita la acumulación y retención de materia orgánica debido a una menor área superficial. Mientras que no se observaron correlaciones significativas entre arena y materia orgánica ni entre finos y materia orgánica. Estos resultados reflejan un claro control granulométrico sobre la distribución de la materia orgánica y una segregación textural típica entre fracciones gruesas y finas del sedimento (**Figura 4**).

Esta evidencia indica que la acumulación de Materia Orgánica en el área de estudio no está fuertemente controlada por la presencia de la fracción fina (lodos) de estas muestras. Lo que difiere con la hipótesis de que las partículas finas ofrecen una mayor área superficial y capacidad de intercambio catiónico, lo que facilita la adsorción y retención de la materia orgánica y otros compuestos orgánicos en el sedimento[25]. Esto puede deberse a la mezcla sedimentaria (renas finas, limos y arcillas), a la dinámica hidrodinámica del área o al tamaño de muestra[26].

	Grava	Arena	Finos	Materia orgánica
Grava		0.74	-0.74	-0.59
Arena	0.74		-0.70	-0.27
Finos	-0.74	-0.70		0.45
Materia orgánica	-0.59	-0.27	0.45	

Figura 4. Mapa de calor de las correlaciones de Spearman entre las fracciones granulométricas y materia orgánica del sedimento (%). Los colores rojos indican correlaciones positivas y los azules correlaciones negativas; la intensidad del color refleja la magnitud de la asociación.

IV. CONCLUSIONES

El análisis granulométrico evidenció una textura mixta en las zonas I y II, asociada a condiciones de alta energía y tráfico marítimo; sin embargo, en las tres zonas se observó una clara predominancia de fracciones finas. Los sedimentos presentaron niveles moderados de materia orgánica y no se identificó una correlación entre el contenido de sedimentos muy finos y la materia orgánica.

V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] "Sediments of Aquatic Ecosystems", pp. 479–490, ene. 2009, doi: 10.1016/B978-012370626-3.00210-6.
- [2] A. Chahouri, I. Lamine, H. Ouchene, B. Yacoubi, A. Moukrim, y A. Banaoui, "Assessment of heavy metal contamination and ecological risk in Morocco's marine and estuarine ecosystems through a combined analysis of surface sediment and bioindicator species: *Donax trunculus* and *Scrobicularia plana*", *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 192, p. 115076, jul. 2023, doi: 10.1016/j.marpolbul.2023.115076.
- [3] O. T. Pineda y J. C. Chang, "GRANULOMETRÍA DE LOS SEDIMENTOS DEL ESTERO FARFÁN, GOLFO DE MONTIJO", *Tecnociencia*, vol. 23, núm. 2, pp. 16–35, jul. 2021.
- [4] Q. Zhou *et al.*, "Geological evolution of offshore pollution and its long-term potential impacts on marine ecosystems", *Geosci. Front.*, vol. 13, núm. 5, p. 101427, sep. 2022, doi: 10.1016/j.gsf.2022.101427.
- [5] DOF, "ACUERDO por el que se da a conocer el resumen del Programa de Manejo del Área Natural Protegida con categoría de Parque Nacional la zona conocida como Sistema Arrecifal Veracruzano." Consultado: el 22 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5483733
- [6] R. E. Zamudio-Alemán, A. Amaro-Espejo, y L. Romero-González, "Metales pesados en sedimento marino del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano", *Rev. Iberoam. Cienc.*, vol. 1, núm. 4, pp. 159–168, 2014.
- [7] A. Granados-Barba, L. Ortiz-Lozano, C. González Gándara, y D. Salas-Monreal, *Estudios científicos en el Corredor Arrecifal del Suroeste del Golfo de México*. 2019.
- [8] J. C. Nava Fuentes, P. Arenas Granados, y F. C. Martins, "Coastal management in Mexico: Improvements after the marine and coastal policy publication", *Ocean Coast. Manag.*, vol. 137, pp. 131–143, mar. 2017, doi: 10.1016/j.ocecoaman.2016.12.017.
- [9] CONANP, "Programa de Manejo Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano". 2017. [En línea]. Disponible en: <https://simec.conanp.gob.mx/ficha.php?anp=135>
- [10] G. I. S. Aguilar, "Las comunidades portuarias en América Latina", *Investig. Cienc. Apl. Ing.*, vol. 7, núm. 43, jun. 2024, Consultado: el 13 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://ojsincaing.com.mx/index.php/ediciones/article/view/316>
- [11] A. G. Ortiz, C. M. González, N. L. Alvarado, J. E. R. Vázquez, y S. R. Vázquez, "Los efectos de la escasez de contenedores vacíos en la cadena logística del Puerto de Manzanillo, México", *Investig. Cienc. Apl. Ing.*, vol. 8, núm. 49, jun. 2025, Consultado: el 13 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://ojsincaing.com.mx/index.php/ediciones/article/view/455>
- [12] D. Pupienis, A. Dubikaitienė, D. Karlonienė, G. Žilinskas, y D. Jarmalavičius, "Spatio-Temporal Variability in Coastal Sediment Texture in the Vicinity of Hydrotechnical Structures Along a Sandy Coast: Southeastern Baltic Sea (Lithuania)", *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 13, núm. 7, p. 1368, jul. 2025, doi: 10.3390/jmse13071368.
- [13] N. Rangel-Buitrago, A. Paternina-Ramos, y W. J. Neal, "Environmental typology of Colombian Caribbean beaches based on sedimentological and colorimetric signatures", *Reg. Stud. Mar. Sci.*, vol. 90, p. 104462, dic. 2025, doi: 10.1016/j.rsma.2025.104462.
- [14] J. Syvitski *et al.*, "Earth's sediment cycle during the Anthropocene", *Nat. Rev. Earth Environ.*, vol. 3, núm. 3, pp. 179–196, mar. 2022, doi: 10.1038/s43017-021-00253-w.
- [15] J. Woo, T. Kim, H. Lee, y M. Choi, "Control factors and contamination assessment of organic matter in Korean coastal sediments", *Reg. Stud. Mar. Sci.*, vol. 89, p. 104343, dic. 2025, doi: 10.1016/j.rsma.2025.104343.
- [16] S. Arndt, B. B. Jørgensen, D. E. LaRowe, J. J. Middelburg, R. D. Pancost, y P. Regnier, "Quantifying the degradation of organic matter in marine sediments: A review and synthesis", *Earth-Sci. Rev.*, vol. 123, pp. 53–86, ago. 2013, doi: 10.1016/j.earscirev.2013.02.008.
- [17] S. A. Schweizer, C. W. Mueller, C. Höschen, P. Ivanov, y I. Kögel-Knabner, "The role of clay content and mineral surface area for soil organic carbon storage in an arable toposequence", *Biogeochemistry*, vol. 156, núm. 3, pp. 401–420, dic. 2021, doi: 10.1007/s10533-021-00850-3.
- [18] M. D. Mapel-Hernández, J. S. Armstrong-Altrin, A. V. Botello, y F. Lango-Reynoso, "Bioavailability of Cd and Pb in sediments of the National Park Veracruz Reef System, Gulf of Mexico", *Appl. Geochem.*, vol. 133, p. 105085, oct. 2021, doi: 10.1016/j.apgeochem.2021.105085.
- [19] C. Linton-Izquierdo *et al.*, "Evaluation of suspended particles in a tropical coral reef system using the backscatter intensity signal of an ADCP", *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 222, p. 118645, ene. 2026, doi: 10.1016/j.marpolbul.2025.118645.
- [20] M. D. Mapel Hernández, "DISTRIBUCIÓN DE METALES PESADOS EN SEDIMENTO DEL PARQUE NACIONAL SISTEMA ARRECIFAL VERACRUZANO; VARIACIONES ESTACIONALES Y BIODISPONIBILIDAD.", sep. 2019, Consultado: el 11 de diciembre de 2025.

- [En línea]. Disponible en: <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/9651>
- [21] “Chapter Eleven Biogenic Sediments”, en *Developments in Marine Geology*, vol. 3, Elsevier, 2008, pp. 365–413. doi: 10.1016/S1572-5480(08)00211-X.
- [22] Y. Ota *et al.*, “Geochemical distribution of heavy metal elements and potential ecological risk assessment of Matsushima Bay sediments during 2012-2016”, *Sci. Total Environ.*, vol. 751, p. 141825, ene. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141825.
- [23] K. G. A. Alcocer, “Fraccionamiento Geoquímico De Cd Y Cu En Sedimentos Bioclásticos Del Sistema Arrecifal Veracruzano, Sur Del Golfo De México”, *UNAM*, 2020, [En línea]. Disponible en: <https://ru.dgb.unam.mx/server/api/core/bitstreams/a795edbf-fe46-4b12-951e-2834e235db39/content>
- [24] M. D. Mapel-Hernández, J. S. Armstrong-Altrin, A. V. Botello, y F. Lango-Reynoso, “Bioavailability of Cd and Pb in sediments of the National Park Veracruz Reef System, Gulf of Mexico”, *Appl. Geochem.*, vol. 133, p. 105085, oct. 2021, doi: 10.1016/j.apgeochem.2021.105085.
- [25] S. A. Schweizer, C. W. Mueller, C. Höschen, P. Ivanov, y I. Kögel-Knabner, “The role of clay content and mineral surface area for soil organic carbon storage in an arable toposequence”, *Biogeochemistry*, vol. 156, núm. 3, pp. 401–420, dic. 2021, doi: 10.1007/s10533-021-00850-3.
- [26] C. Smeaton y W. E. N. Austin, “Quality Not Quantity: Prioritizing the Management of Sedimentary Organic Matter Across Continental Shelf Seas”, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 49, núm. 5, p. e2021GL097481, 2022, doi: 10.1029/2021GL097481.