

# Influencia de El Niño de 2023-2024 en las características hidrológicas de un estuario tropical

Martinez-Sanchez, Gabriela

Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Civil  
Ciudad de Panamá, Panamá  
gabriela.martinez1@utp.ac.pa

Vergara-Chen, Carlos

Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Civil  
Ciudad de Panamá, Panamá  
carlos.vergara3@utp.ac.pa

## Abstract

Climate change has drawn increasing attention for its impacts on estuarine systems; however, short-term climatic disturbances such as the El Niño–Southern Oscillation (ENSO) remain insufficiently documented. In recent years, ENSO events have become more frequent and intense, exerting hydric stress on estuaries. This study aimed to describe the effects of the 2022–2024 ENSO-related drought on hydrological parameters in the Río Salado–Bahía de Chame estuary. Seasonal and interannual variability of precipitation, pH, salinity, temperature, and dissolved oxygen (DO) was analyzed across three wet and two dry seasons between 2022 and 2024 at four sites along the estuarine gradient.

Precipitation anomalies were observed, with decreases of 12.09% in 2023 and 61.76% in 2024 compared to 2022, evidencing the influence of the 2023–2024 El Niño on freshwater inflow reduction. This decline was associated with increased salinity of up to 9 units along the estuary, indicating stronger saline intrusion. A decrease in pH was also recorded, reaching 7.00 in the upper estuary in 2024, together with a general rise in temperature. DO concentrations significantly declined in the upper and middle estuary during El Niño phases, suggesting hypoxia and potential eutrophication enhanced by hydric and thermal stress.

Overall, the results demonstrate that short-term climatic variability can alter the natural hydrological dynamics of tropical estuaries, affecting their structure and function. These findings provide a baseline for future modeling of ENSO effects across different phases in estuarine systems of the Gulf of Panama.

**Keywords:** physicochemical characteristics, spatiotemporal variability, ENSO, hypoxia, hydrological variability.

## Resumen

El cambio climático es de interés por los efectos sobre los estuarios, pero las perturbaciones climáticas a corto plazo, como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), han sido poco documentadas. En los últimos años, estos fenómenos son más frecuentes e intensos, generando estrés hídrico en los estuarios. Este trabajo tuvo como objetivo describir los efectos de la sequía relacionada con el ENOS 2022-2024 en parámetros hidrológicos del estuario del Río Salado-Bahía de Chame. Se analizó la variabilidad estacional e interanual de la precipitación, pH, salinidad, temperatura y oxígeno disuelto (OD) durante tres temporadas lluviosas y dos secas entre 2022 y 2024, en cuatro sitios de muestreo.

Se registraron precipitaciones con disminuciones del 12.09% en 2023 y 61.76% en 2024 respecto a 2022, evidenciando la influencia de El Niño 2023-2024 en la reducción del aporte fluvial. Esta disminución se asoció con un aumento de salinidad de hasta 9 unidades a lo largo del estuario, indicando mayor intrusión salina. También se observó una disminución del pH, alcanzando valores de 7.00 en la parte alta en 2024, y un aumento general de la temperatura. El OD mostró una reducción significativa en el estuario alto y medio durante la fase de El Niño, sugiriendo hipoxia y posible eutrofización.

El estudio demuestra que la variabilidad climática a corto plazo puede alterar la dinámica hidrológica natural del estuario, afectando su estructura y funcionamiento. Los resultados ofrecen una línea base para modelar los efectos del ENOS en diferentes fases en los estuarios del Golfo de Panamá.

**Palabras claves:** características fisicoquímicas, variabilidad espaciotemporal, ENOS, hipoxia, variabilidad hidrológica.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los estuarios tropicales consisten en zonas de transición en donde se da la mezcla de agua dulce con salada, como resultado del proceso de la entrada de las aguas oceánicas a las masas de tierra y del transporte de agua continental, así mismo como de materia orgánica, a través de las escorrentías superficiales y subterráneas, que desembocan en el sistema estuarino [1], [2]. Los ecosistemas estuarinos son sistemas altamente complejos y dinámicos. Sus múltiples componentes como organismos, nutrientes, el agua y sedimentos interactúan de formas intrincadas, variando constantemente en tiempo y espacio a lo largo del sistema hídrico [3]. Procesos como el movimiento del agua, el ciclo de nutrientes y la dinámica de la cadena trófica conectan estos componentes en una jerarquía de interacciones y procesos ecológicos [4]. Por consiguiente y considerando el complejo balance, factores climáticos externos influyen de manera directa sobre ellos.

Tal es el caso del cambio climático, que es sin duda uno de los retos actuales con mayor

relevancia, razón por lo cual ha sido ampliamente estudiado durante las últimas décadas [5], [6]. Este proceso climático global profundamente alterado y acelerado por las actividades humanas ha traído consigo un sinnúmero de consecuencias riesgosas que afectan a todos los ecosistemas, con marcados impactos ecológicos por la pérdida de biodiversidad, aumento de la temperatura y del nivel del mar [7], [8]. Además de estos efectos globales, el cambio climático puede modificar la variabilidad natural del clima, alterando la frecuencia e intensidad de eventos como el Fenómeno de El Niño–Oscilación del Sur (ENOS), los cuales influyen significativamente en los patrones de precipitación y, por tanto, en la hidrodinámica y el balance biogeoquímico de los estuarios tropicales [9], [10].

Aunque existen investigaciones sobre los efectos del ENOS en sistemas costeros, como el trabajo de Da Costa Silva [11] en Brasil, los estudios que abordan de forma directa la respuesta de estuarios tropicales al ENOS y en particular en Panamá siguen siendo escasos [12]. Durante la fase Niño del ENOS ocurrida en 2023–2024, se registraron condiciones anómalas de sequía, aumento de la temperatura superficial y reducción significativa de las precipitaciones en gran parte del territorio panameño [13], [14], [15], [16]. Estas perturbaciones climáticas pueden alterar los gradientes de salinidad, el balance hídrico del sistema, la disponibilidad de oxígeno disuelto (llevando al ecosistema a episodios de hipoxia), generando estrés hídrico y térmico sobre las comunidades biológicas que habitan estos ecosistemas. La comprensión de estas variaciones resulta fundamental para anticipar los posibles efectos sobre la resiliencia y el funcionamiento del sistema estuarino bajo escenarios de cambio climático global [17], [18].

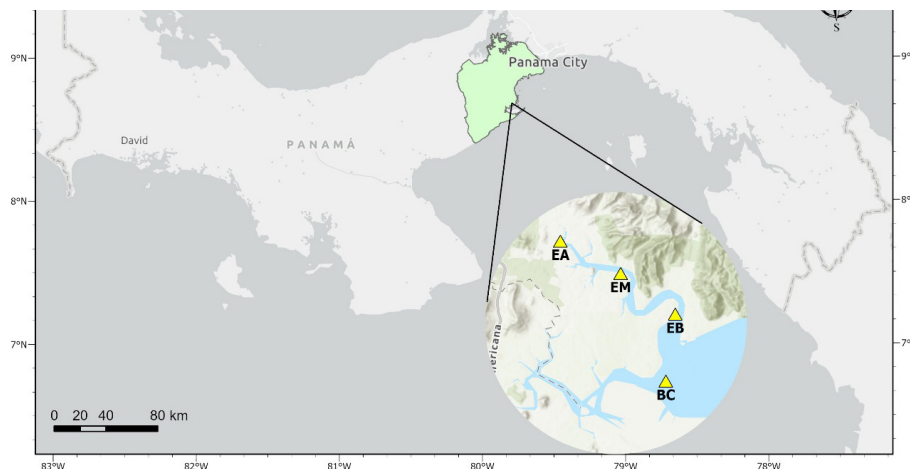
En este contexto, este estudio tuvo como objetivo describir los efectos de la fase El Niño asociada al ENOS 2023–2024 sobre los parámetros hidrológicos del estuario del Río Salado, Bahía de Chame, costa Pacífica de Panamá. Se analizó la variabilidad estacional-anual de la precipitación, pH, salinidad, temperatura y oxígeno disuelto (OD) durante tres temporadas lluviosas y dos épocas secas comprendidas entre 2023 y 2024, en cuatro sitios de muestreo distribuidos a lo largo del gradiente estuarino.

Este trabajo busca reducir la brecha científica sobre cómo los eventos climáticos extremos pueden modificar la dinámica hidrológica natural de los estuarios tropicales, afectando su funcionamiento y resiliencia. Además, los resultados proporcionan una línea base que podría ser utilizada en el desarrollo de modelos predictivos sobre los efectos de las distintas fases del ENOS (El Niño, La Niña y neutra) en los ecosistemas estuarinos de Panamá y posiblemente en otras zonas tropicales con condiciones similares.

## 2. MÉTODO

La selección de los puntos de muestreo está basada en estudios previos [19], [20], [21], para considerar datos consecutivos del área de estudio en temporada lluviosa y seca

desde el 2023-2024. El estuario del río Salado se dividió en 4 puntos: estuario alto (EA), estuario medio (EM), estuario bajo (EB) y Bahía de Chame (BC) (Figura 1) para la descripción espaciotemporal.



**Figura 1. Sitios de muestreo en el estuario del río Salado, Bahía de Chame**

El análisis se realizó combinando datos de precipitación satelital y mediciones in situ de parámetros fisicoquímicos, para evaluar la influencia del fenómeno El Niño–Oscilación del Sur (ENOS) 2023–2024 sobre la dinámica hidrológica del estuario del Río Salado–Bahía de Chame.

Se utilizaron imágenes satelitales del CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data), las cuales poseen información de sensores remotos con registros locales. Este proporciona estimaciones de precipitación diaria con alta resolución espacial, la cual se consideró necesaria en vista de que la estación meteorológica más cercana al área de estudio está a más de 60 km de distancia. Para identificar las anomalías de precipitación asociadas al ENOS, se promediaron los valores diarios para obtener el valor promedio mensual y así comparar anualmente con el siguiente año.

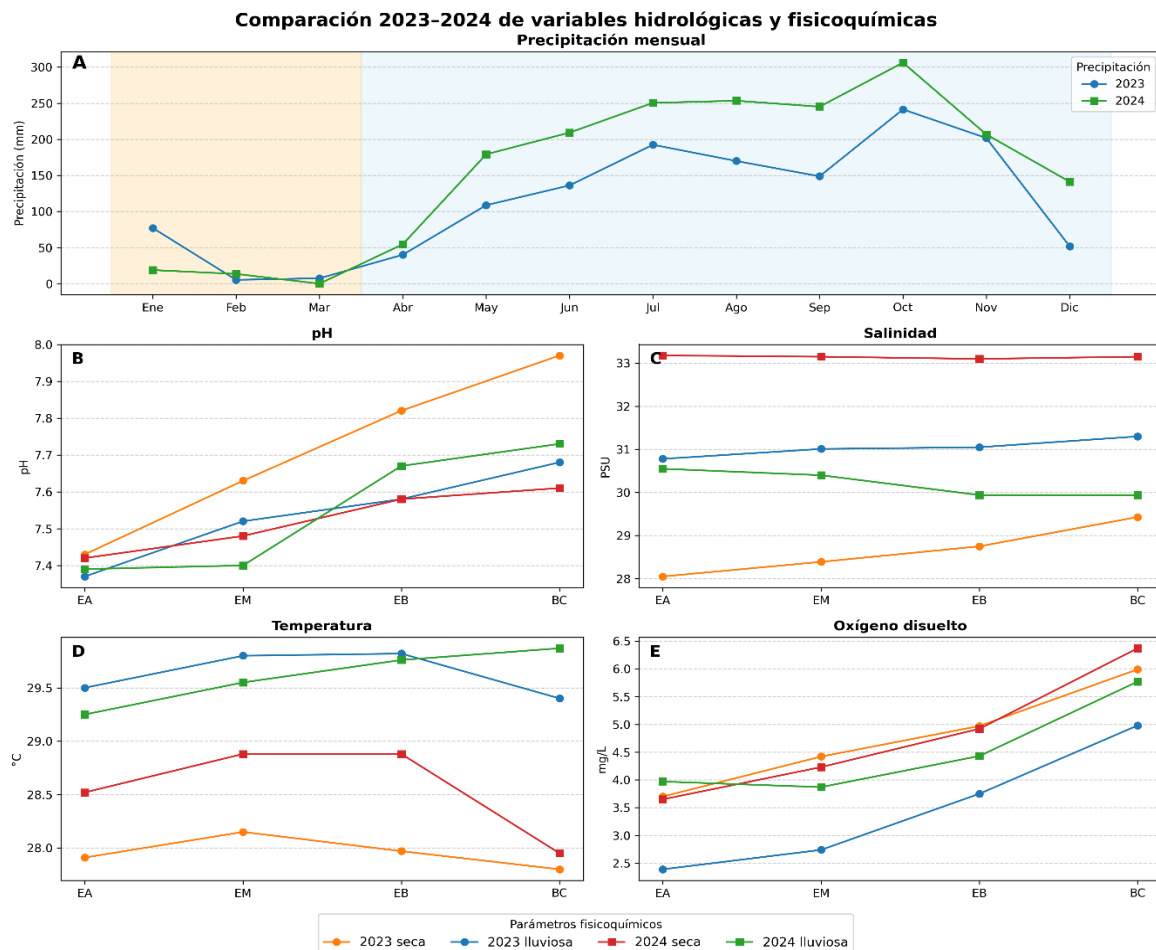
Los muestreos se realizaron in situ mediante un total de cuatro campañas por temporadas, durante el periodo comprendido entre 2023 y 2024. En cada campaña se registraron los parámetros pH, salinidad, temperatura y oxígeno disuelto (OD) utilizando una sonda multiparamétrica YSI ProQuatro.

Se graficaron las series temporales continuas para visualizar los cambios estacionales e interanuales tanto en la precipitación como en los parámetros fisicoquímicos. Los resultados se representaron mediante gráficas comparativas, las cuales permitieron relacionar el fenómeno climático, la estacionalidad con los parámetros estudiados.

### 3. RESULTADOS

#### Dinámica hidrológica y fisicoquímica durante el 2023

Para las gráficas anuales de precipitación se considera ambas temporadas (Figura 2) por lo que se hizo distinción entre la temporada seca (sección sombreada de amarillo) y la temporada lluviosa (sección sombreada de celeste), en las cuales se observan las diferencias estacionales en la hidrología del estuario.



**Figura 2. Variables hidrológicas y fisicoquímicas A) Precipitación, B) pH, C) Salinidad, D) Temperatura y E) Oxígeno disuelto.**

En general, el comportamiento de la precipitación mantuvo el patrón estacional típico de la región del Pacífico panameño. Durante el 2023, bajo fase El Niño del fenómeno, la precipitación presentó una reducción [13] de aproximadamente del 30% en comparación al 2022 el cual fue clasificado como fase La Niña. Esta disminución de descarga fluvial altera el equilibrio del intercambio de aguas dulces y saladas, por lo que favorece la intrusión marina [1], [17]. En consecuencia, el pH mostró un incremento gradual desde la parte alta

hacia la bahía en las temporadas, con valores ligeramente más bajos durante la época seca del 2024 debido al escaso recambio de agua y la acumulación de CO<sub>2</sub> disuelto del 2023 [2], [22]. En la temporada lluviosa, los valores se mantuvieron similares anualmente. En cuanto a la salinidad, se observó un gradiente ascendente a lo largo del estuario en ambos años, con valores particularmente elevados durante 2024. Esto sugiere una mayor intrusión marina y menor dilución incluso durante la temporada lluviosa, posiblemente por el efecto residual de la sequía del año anterior y la constante intrusión de aguas oceánicas [20], patrón que coincide con lo reportado para otros estuarios del Pacífico panameño, como el Golfo de Montijo [23]. En 2023, la salinidad también aumentó, pero mostró mayor variabilidad espacial, especialmente en los sectores intermedios del estuario, donde la mezcla entre aguas dulces y saladas depende directamente de las descargas fluviales [1], [24]. La temperatura del agua se mantuvo relativamente estable en el periodo analizado, con valores más altos en la temporada seca debido a la radiación directa sobre un volumen de agua reducido. Durante la temporada lluviosa, la temperatura disminuyó levemente, influenciada por la recarga de agua dulce y la mezcla vertical. En 2024 se registraron valores ligeramente superiores a los de 2023, lo que puede asociarse al efecto acumulativo del calentamiento superficial producto de las condiciones prolongadas de El Niño [25].

El oxígeno disuelto (OD) mostró los contrastes más marcados entre estaciones y años. En 2023 se observaron los valores más bajos, especialmente en la parte alta del estuario durante la estación seca, con concentraciones que sugieren condiciones hipóxicas localizadas. Esta reducción puede asociarse a la baja renovación de agua, el aumento de temperatura y la descomposición de materia orgánica acumulada, tal como han descrito [18], [19]. En 2024, aunque los valores de OD siguieron siendo menores durante la estación seca, se evidenció una ligera recuperación durante la temporada lluviosa, alcanzando concentraciones superiores a 5 mg/L en la zona de la bahía, lo que indica que el sistema empezó a estabilizarse gradualmente conforme aumentó la precipitación.

En conjunto, los resultados demuestran que la variabilidad climática anual asociada al fenómeno ENOS afectó significativamente la dinámica hidrológica y fisicoquímica del estuario. La reducción de la precipitación durante el evento El Niño 2023–2024 alteró el balance hídrico, incrementó la salinidad y redujo la disponibilidad de oxígeno, generando condiciones de estrés hídrico y térmico para las comunidades biológicas [3], [7]. Aunque en 2024 se observó una leve recuperación en algunas variables, los efectos del déficit hídrico persistieron, evidenciando la vulnerabilidad del sistema ante perturbaciones climáticas de corta duración [8], [12].

## 4. CONCLUSIONES

Se describió los efectos de la fase El Niño asociada al ENOS 2023–2024 sobre los parámetros hidrológicos del estuario del Río Salado, Bahía de Chame, costa Pacífica de Panamá. Durante el año 2023, bajo la influencia de una fase Niño fuerte, caracterizada por un inicio reducido de las lluvias, los parámetros fisicoquímicos del estuario mostraron una respuesta progresiva y relativamente estable frente a las condiciones climáticas. En cambio, en 2024, con la llegada de lluvias más intensas y tempranas, la respuesta del sistema fue más evidente: se observó un descenso en la salinidad, un incremento más rápido del pH y mayores concentraciones de oxígeno disuelto. Hacia finales de 2024 se declaró la entrada a una fase La Niña débil; sin embargo, durante 2025 el sistema climático se ha mantenido en una fase neutra, lo que podría explicar el aumento de las precipitaciones registrado a finales de 2024.

Estos resultados confirman que la precipitación no solo regula la estacionalidad hidrológica del estuario, sino que también influye en la mezcla de aguas, la intrusión marina y la dinámica biogeoquímica. Los fenómenos climáticos como el ENOS están ocurriendo con mayor frecuencia e intensidad debido a las alteraciones del sistema climático global, reflejando los efectos del cambio climático sobre los ecosistemas tropicales. Por ello se destaca la importancia de estudiar la dinámica de los ecosistemas y así permita comprender los procesos de respuesta del estuario frente a eventos climáticos extremos y auxiliar el diseño de estrategias y acciones de manejo ambiental.

## Referencias

- [1] C. Medeiros and B. Kjerfve, "Hydrology of a Tropical Estuarine System: Itamaracá, Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 36(5), 495–515 | 10.1006/ecss.1993.1030," *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 36, pp. 495–515, 1993, Accessed: May 13, 2025. [Online]. Available: <https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1006/ecss.1993.1030>
- [2] S. Wu et al., "Characteristics of Sedimentary Organic Matter in Tidal Estuaries: A Case Study from the Minjiang River Estuary," *Water* 2023, Vol. 15, Page 1682, vol. 15, no. 9, p. 1682, Apr. 2023, doi: 10.3390/W15091682.
- [3] E. J. Douglas, A. M. Lohrer, and C. A. Pilditch, "Biodiversity breakpoints along stress gradients in estuaries and associated shifts in ecosystem interactions," *Sci Rep*, vol. 9, no. 1, Dec. 2019, doi: 10.1038/S41598-019-54192-0.
- [4] R. Kenneth, E. Reyes, and J. Dubravko, *Estuarine Ecology*, 3rd edition. Wiley, 2023.
- [5] A. Engels, "Energy and Emission Control Technologies Anthropogenic climate change: how to understand the weak links between scientific evidence, public perception, and low-carbon practices," 2016, doi: 10.2147/EECT.S63005.
- [6] G. Hansen and D. Stone, "Assessing the observed impact of anthropogenic climate change," *Nat Clim Chang*, vol. 6, no. 5, pp. 532–537, Apr. 2016, doi: 10.1038/NCLIMATE2896;TECHMETA=119;SUBJMET A=106,2739,674,694,704;KWRD=ATTRIBUTION,CLIMATE-CHANGE+IMPACTS.
- [7] A. K. Priya et al., "Impact of climate change and anthropogenic activities on aquatic ecosystem – A review," *Environ Res*, vol. 238, p. 117233, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.ENVRES.2023.117233.

- [8] B. Talukder, N. Ganguli, R. Matthew, G. W. vanLoon, K. W. Hipel, and J. Orbinski, "Climate change-accelerated ocean biodiversity loss & associated planetary health impacts," *The Journal of Climate Change and Health*, vol. 6, p. 100114, May 2022, doi: 10.1016/J.JOCLIM.2022.100114.
- [9] W. Cai et al., "Changing El Niño–Southern Oscillation in a warming climate," *Nature Reviews Earth & Environment* 2021 2:9, vol. 2, no. 9, pp. 628–644, Aug. 2021, doi: 10.1038/s43017-021-00199-z.
- [10] G. E. Molina-Bolívar, M. L. Nava Ferrer, and I. A. Jiménez Pitre, "Water Physicochemical Variables In The Rancheria River Delta, La Guajira, Colombia," *Ciencia en Desarrollo*, vol. 11, no. 1, pp. 21–32, 2020, doi: 10.19053/01217488.v11.n1.2020.6120.
- [11] T. Raelly Da Costa Silva et al., "El Niño-Driven Changes in Zooplankton Community Structure in an Amazonian Tropical Estuarine Ecosystem (Taperaçu, Northern Brazil)," *Coasts* 2025, Vol. 5, Page 39, vol. 5, no. 4, p. 39, Oct. 2025, doi: 10.3390/COASTS5040039.
- [12] E. Díaz-Ferguson et al., "Recomendaciones para la conservación de los estuarios y restauración de los manglares de Centroamérica y Sudamérica," 2024, Accessed: Nov. 10, 2025. [Online]. Available: [www.iai.int](http://www.iai.int)
- [13] IMHPA, "Comportamiento de las lluvias en las cuencas hidrográficas en Panamá. Período: desde el año 2022 hasta agosto 2023," Sep. 2023. Accessed: Nov. 12, 2025. [Online]. Available: [https://www.imhpa.gob.pa/uploads/documentos/09Act\\_InformeElNino23.pdf](https://www.imhpa.gob.pa/uploads/documentos/09Act_InformeElNino23.pdf)
- [14] S. Ruiz and C. Shintani, "Drought, Climate, and the Panama Canal - Woodwell Climate," Woodwell Climate Research Center, Feb. 20, 2024. Accessed: Nov. 10, 2025. [Online]. Available: [https://www.woodwellclimate.org/drought-panama-canal-7-graphics/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.woodwellclimate.org/drought-panama-canal-7-graphics/?utm_source=chatgpt.com)
- [15] The World Bank Group, "Climate Risk Country Profile: Panama," 2024. Accessed: Nov. 10, 2025. [Online]. Available: [www.worldbank.org](http://www.worldbank.org)
- [16] UNCCD, "Drought Hotspots Around the World 2023-2025," United Nations Convention to Combat Desertification . Accessed: Nov. 10, 2025. [Online]. Available: [https://www.unccd.int/sites/default/files/2025-07/Drought%20Hotspots%202023-2025\\_ENG.pdf?](https://www.unccd.int/sites/default/files/2025-07/Drought%20Hotspots%202023-2025_ENG.pdf?)
- [17] D. Chilton et al., "Environmental Flow Requirements of Estuaries: Providing Resilience to Current and Future Climate and Direct Anthropogenic Changes," *Front Environ Sci*, vol. 9, Nov. 2021, doi: 10.3389/FENVS.2021.764218/FULL.
- [18] K. Waddington, A. Harrison, D. Rayner, T. Tucker, and W. Glamore, "Estuarine Hypoxia—Identifying High Risk Catchments Now and Under Future Climate Scenarios," *Water Resour Res*, vol. 59, no. 9, Sep. 2023, doi:
- [19] G. Martínez et al., "Calidad del agua y flujo de CO<sub>2</sub> en el estuario del Río Salado, Bahía de Chame, Pacífico de Panamá," *Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología – APANAC*, pp. 210–217, 2023, doi: 10.33412/apanac.2023.3937.
- [20] B. Rodriguez, J. Vasquez, Y. Gonzalez, A. A. Grey, G. Collado, and C. Vergara-Chen, "Nutrient distribution in a mangrove estuary in Bahia de Chame," *Proceedings - 2024 9th International Engineering, Sciences and Technology Conference, IESTEC 2024*, pp. 303–307, 2024, doi: 10.1109/IESTEC62784.2024.10820243.
- [21] C. Vergara-Chen, A. Medina, G. Martinez, M. Quintero, G. Collado, and C. A. Vargas, "Exploring oxygen consumption of the bivalve *Anadara tuberculosa* under contrasting environmental conditions," *Proceedings - 2024 9th International Engineering, Sciences and Technology Conference, IESTEC 2024*, pp. 127–129, 2024, doi: 10.1109/IESTEC62784.2024.10820222.
- [22] W. J. Cai et al., "Natural and Anthropogenic Drivers of Acidification in Large Estuaries," *Ann Rev Mar Sci*, vol. 13, pp. 23–55, 2021, doi: 10.1146/annurev-marine-010419-011004.

- [23] A. L. García, D. Araúz, E. Martínez, and J. Molino, “Environmental characterization of the estuarine zone of the Gulf of Montijo, province of Veraguas, Panama,” *PLoS One*, vol. 18, no. 6, p. e0283606, Jun. 2023, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0283606.
- [24] Y. Cardona et al., “Influence of River Discharge and Tides on the Salinity Structure at the Magdalena River Estuary,” *Estuaries and Coasts* 2024 48:1, vol. 48, no. 1, pp. 23-, Nov. 2024, doi: 10.1007/S12237-024-01435-7.
- [25] A. Timmermann et al., “El Niño–Southern Oscillation complexity,” *Nature* 2018 559:7715, vol. 559, no. 7715, pp. 535–545, Jul. 2018, doi: 10.1038/s41586-018-0252-6.

## AUTORIZACIÓN Y LICENCIA CC

Los autores autorizan a APANAC XVIII a publicar el artículo en las actas de la conferencia en Acceso Abierto (Open Access) en diversos formatos digitales (PDF, HTML, EPUB) e integrarlos en diversas plataformas online como repositorios y bases de datos bajo la licencia CC:

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.

Ni APANAC XVIII ni los editores son responsables ni del contenido ni de las implicaciones de lo expresado en el artículo.