

**Dynamics of dissolved oxygen in the water of the El Soldado estuary:
a pristine semi-arid subtropical system.**

**Dinámica del oxígeno disuelto en el agua del
estero El Soldado: un sistema prístino
semi-árido subtropical**

Aurora Ávila García¹, José Alfredo Arreola Lizárraga,
Ramón Héctor Barraza Guardado, Luis Brito Castillo y Edgar Alcántara Razo

Resumen

El oxígeno disuelto (OD) es fundamental para la vida acuática y conocer su variación es útil para evaluar la calidad ambiental y orientar el manejo de ecosistemas acuáticos, incluyendo estuarios y lagunas costeras. Este estudio se realizó en el estero El Soldado (ES) con el objetivo de conocer la variabilidad del OD durante un ciclo anual. El estero ES, es una Área Natural Protegida ubicada en una región semi-árida subtropical en la costa Este del Golfo de California. Tiene un área de 1.6 km², profundidad promedio de 0.6 m, una boca de comunicación permanente con el mar y amplitud de marea de ~ 1 m. En un sitio del estero se instaló una sonda marca HYDROLAB modelo DATASONDE 5X, y se registraron oxígeno disuelto, temperatura y salinidad del agua cada 30 minutos a través de un ciclo anual. Los resultados mostraron que las concentraciones (mg L⁻¹) de OD durante el ciclo anual (n=15,645) tuvieron un intervalo anual de 2.8-10, mediana 6.3 y promedio 6.4 ± 0.99. La variabilidad de las concentraciones de OD mostraron que el estero El Soldado mantiene condiciones saludables para la vida acuática.

Palabras clave: Oxígeno disuelto, estero, área natural protegida, Golfo de California

Abstract

Dissolved oxygen (DO) is essential for aquatic life and knowing its variation is useful to the assessment of environmental quality and guide the management of aquatic ecosystems, including

¹Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. Email: auro.ag@hotmail.com; aavila@pg.cibnor.mx

estuaries and coastal lagoons. This study was conducted at El Soldado (ES) estuary, with the objective of knowing the variability of the DO during an annual cycle. This estuary is a Natural Protected Area located in a semi-arid subtropical region on the East coast of the Gulf of California. It has an area of 1.6 km², a depth mean of 0.6 m, a mouth with permanent communication with the sea and tidal range of ~ 1 m. A HYDROLAB sonde was installed in a site inside the estuary, dissolved oxygen, temperature and salinity of the water were registered each 30 minutes through an annual cycle. The results showed that the concentrations (mg L⁻¹) of DO during the annual cycle (n = 15,645) had an annual range of 3-10, median 6.3 and mean 6.4 ± 0.99. The variability of DO concentrations by high frequency records showed that El Soldado estuary maintains healthy conditions for aquatic life.

Key words: Dissolved oxygen, estuary, protected area, Gulf of California

Introducción

En lagunas costeras y estuarios, las características físico-químicas del agua son variables tanto espacial como temporalmente, debido a que están regidas conjuntamente por tipos de cuencas, regímenes de mareas, geomorfología, clima y actividad humana, y debido a su continuo cambio, la calidad del agua en estos ecosistemas resulta de interés para entender procesos ecológicos (Briciu-Bughina *et al.*, 2014).

En particular, el oxígeno disuelto (OD) en ecosistemas acuáticos es fundamental para la vida acuática y el conocimiento de su variabilidad es esencial para determinar la calidad ambiental de ecosistemas como las lagunas costeras y estuarios (Santana *et al.*, 2018).

En el ambiente marino, las principales fuentes de oxígeno son: (1) el intercambio gaseoso de oxígeno atmosférico a través de la interfaz superficial aire-mar y (2) la producción *in situ* de oxígeno, a través de la fotosíntesis realizada por los distintos productores marinos (Best *et al.*, 2007). Es importante considerar que el OD es excepcionalmente variable en escalas cortas de tiempo, por ejemplo, su variabilidad en un ciclo diurno está asociado a las tasas de producción y consumo de oxígeno, las cuales fluctúan en respuesta a diferentes factores ambientales (Nezlin *et al.*, 2009).

El monitoreo continuo de la calidad del agua mediante sensores *in situ* ofrece una mejor representación de su variabilidad temporal y espacial en cualquier cuerpo de agua (Briciu-Burghina

et al., 2014) y este monitoreo de alta frecuencia puede proporcionar información más detallada de la exposición de los organismos a condiciones potencialmente estresantes de calidad del agua (Jones y Graziano, 2013). Además, permite exhibir el comportamiento de la condición ambiental del cuerpo de agua, donde los procesos hidrológicos tienen variaciones en escalas de minutos a horas (Horsburgh *et al.*, 2010). Específicamente, el monitoreo continuo de la variabilidad de las concentraciones de OD en el agua ayuda a conocer la dinámica ambiental y las condiciones de salud del ecosistema (Best *et al.*, 2007). Por ejemplo, la hipoxia ($OD < 3 \text{ mg L}^{-1}$) se puede caracterizar en función de la frecuencia, duración e intensidad de los eventos con poco oxígeno, lo cual puede afectar a los peces y la fauna sésil (Díaz y Breitberg, 2009).

En este estudio se realizó un monitoreo continuo de oxígeno disuelto, así como de temperatura y salinidad del agua a través de un ciclo anual con el objetivo de conocer la dinámica del oxígeno disuelto en el Área Natural Protegida estero El Soldado.

Materiales y Métodos

El estero El Soldado es propiamente una laguna costera que se ubica en la costa este del Golfo de California (Fig. 1). Se clasifica como tipo III B por ser una depresión de la plataforma continental que ha sido rodeada por cordones de arena acumulados por las corrientes litorales y el oleaje (Lankford, 1977). Tiene un área de espejo de agua de 1.6 km^2 , profundidad promedio de 0.60 m y una boca de comunicación permanente con el mar de $\sim 50 \text{ m}$. La amplitud de marea es de 1 m (Filloux, 1973) y clasifica como laguna micromareal (Davies, 1964).

El tipo de clima es muy árido y seco, con lluvias en los meses de verano e invierno, y con temperatura promedio anual de 25° (García, 2004). En la región, la precipitación anual es $< 300 \text{ mm}$ y evaporación de $\sim 2800 \text{ mm}$ (Ruiz-Ruiz *et al.*, 2016) y los aportes de agua dulce al estero provienen exclusivamente de las escorrentías de lluvias.

En el agua han sido registrados promedios anuales de oxígeno disuelto de 6.7 mg L^{-1} , temperatura de 26.8°C y de salinidad 36.2 ups (Mata-Ángeles *et al.*, 2019).

En un sitio del estero (Fig. 1) se instaló una sonda marca HYDROLAB modelo DATASONDE 5X programada para registrar con una frecuencia de cada 30 minutos a través de un ciclo anual (junio 2016 - junio 2017), el oxígeno disuelto y la temperatura del agua. Se utilizó un sitio de monitoreo porque se contaba con una única sonda, pero esta se colocó en un punto estratégico del canal principal del estero por donde diariamente ocurre el flujo y reflujo de marea y considerando

que la tasa de renovación del agua del estero es < 3 días (Medina-Galvan et al., 2019), entonces los datos obtenidos cada 30 minutos a través de un año se consideraron consistentes para representar la dinámica del oxígeno disuelto.

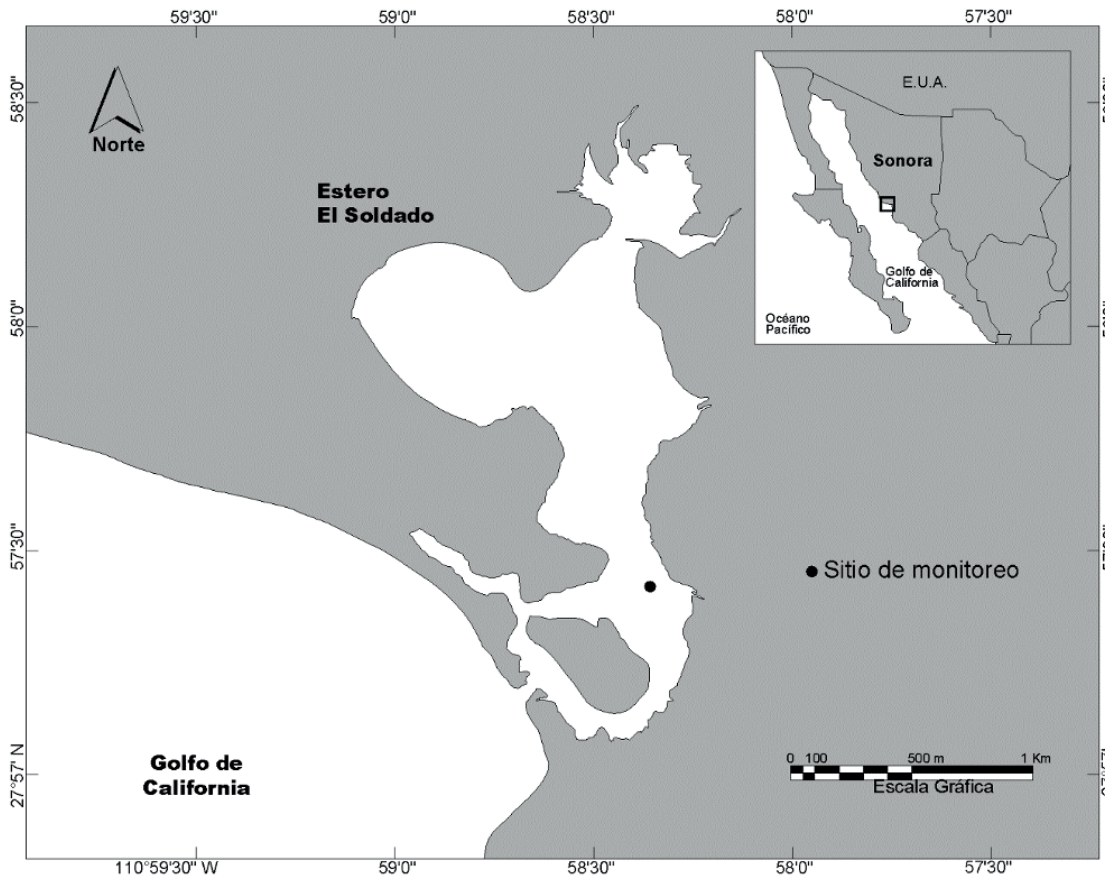


Figura 1. Área de estudio indicando el sitio donde se instaló la sonda para realizar el monitoreo oxígeno disuelto, temperatura y salinidad del agua.

La sonda se sacó del estero cada diez días para descargar los datos, proporcionar servicio de limpieza y mantenimiento, programarla nuevamente y colocarla en el estero para continuar el monitoreo.

Los datos registrados en el ciclo anual ($n = 15,645$) se procesaron en hoja de cálculo Microsoft Excel 2016 y se elaboraron gráficos para mostrar el comportamiento anual de oxígeno disuelto, temperatura y salinidad del agua.

La variabilidad de las concentraciones de oxígeno disuelto entre los meses del año fue analizada mediante comparación de medias con análisis de varianza y con una significancia $p < 0.05$ y los resultados se mostraron mediante un gráfico de cajas y bigotes. Los análisis se realizaron con el paquete estadístico STATGRAPHICS Plus 4.1.

Resultados y Discusión

Las concentraciones de OD entre los meses del año, mostraron que diciembre, enero, febrero, marzo tuvieron los valores promedio más altos con diferencias significativas al resto de los meses; asimismo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre tuvieron los valores promedio más bajos con diferencias significativas al resto de los meses (Fig. 2.).

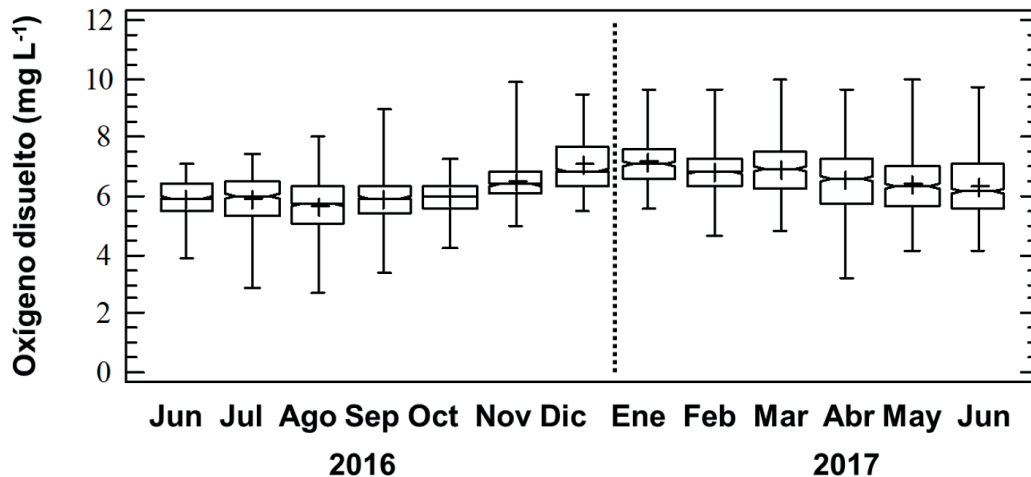


Figura 2. Análisis comparativo de las concentraciones de oxígeno disuelto del agua entre meses durante un ciclo anual en el estero El Soldado. En cada mes los datos corresponden a registros cada 30 minutos. Promedio, mediana, cuartiles y valores mínimo y máximo se muestran para cada mes.

Se observó que los valores de oxígeno disuelto y temperatura del agua mostraron un comportamiento inverso a través del ciclo anual; esto fue más marcado en los períodos cálido de junio a septiembre y frío de diciembre a febrero (Fig. 3a,b). También fue notable que valores > 9 mg L^{-1} de OD se observaron con mayor frecuencia de noviembre a marzo (Fig. 3a). La salinidad del agua tuvo 36 - 39 ups en la mayor parte del año y únicamente disminuyó (< 30 ups) durante eventos de lluvias en julio, agosto, septiembre y enero (Fig. 3c).

Las observaciones de oxígeno disuelto en el agua del estero El Soldado a partir de registros c/30 min durante un ciclo anual, aportaron nueva evidencia de la magnitud de su variabilidad y permitieron detectar la ocurrencia y duración de eventos de hipoxia. Esto permite conocer información más detallada de la exposición de la fauna acuática a condiciones potencialmente estresantes de calidad del agua (Jones y Graziano, 2013), considerando la importancia que tiene discernir la ocurrencia de eventos de hipoxia y anoxia, los cuales difieren cuantitativamente en la disponibilidad de oxígeno, así como cualitativamente en la presencia de compuestos tóxicos tales como sulfuro de hidrógeno (Diaz y Breitbart, 2009).

En particular, las concentraciones de OD $< 4 \text{ mg L}^{-1}$ se observaron como eventos puntuales durante julio, agosto y septiembre, y eventos de hipoxia (OD $< 3 \text{ mg L}^{-1}$) ocurrieron uno en julio y otro en agosto por periodos menores a tres horas. Estos resultados son relevantes porque no se registraron condiciones de anoxia y los eventos de hipoxia fueron escasos, de poca duración y poca intensidad. Estas condiciones del oxígeno disuelto en el agua son atribuidas a la disminución de la solubilidad del gas debido valores de temperatura del agua $> 30 \text{ }^\circ\text{C}$ en estos meses que además favorecen el incremento en las tasas de respiración del ecosistema dominando el metabolismo heterótrofo como ha sido observado en sistemas lagunares de esta región (Valenzuela-Siu *et al.*, 2007), adicionalmente existe un ingreso de materia orgánica por ser el periodo de mayor precipitación (Brito-Castillo, 2010) y mayor aporte de hojarasca de manglar en esta región semi-árida del Golfo de California (Arreola-Lizárraga *et al.*, 2004) y esto incrementa la demanda oxígeno para la oxidación de esta materia orgánica. Sin embargo, el estero tiene una tasa de recambio de agua < 3 días (Medina-Galván *et al.*, 2019) asociada al flujo y reflujo del agua por acción de la marea y esto también limita tanto los eventos de anoxia como la duración de los eventos de hipoxia.

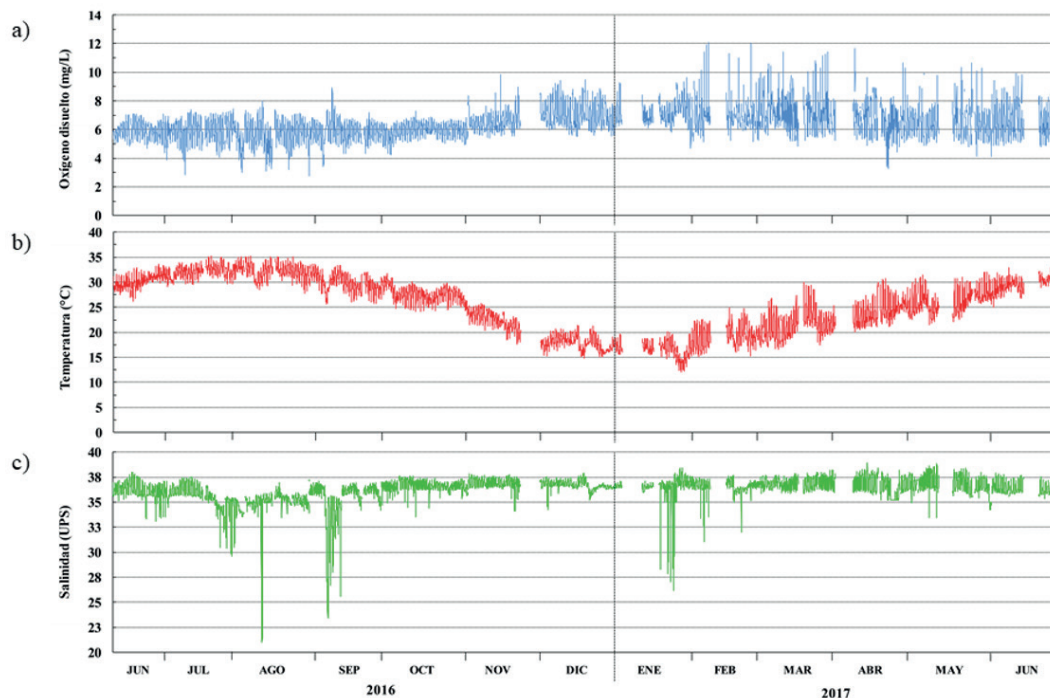


Figura 3. Comportamiento de oxígeno disuelto, temperatura y salinidad del agua con registros cada 30 minutos durante un ciclo anual en el estero El Soldado.

El incremento de concentraciones de oxígeno disuelto en el agua y mayor variabilidad diurna con valores entre 5 y 10 mg L^{-1} durante diciembre, enero, febrero y marzo, es atribuido al incremento de la solubilidad del gas debido a valores de temperatura del agua $< 20 \text{ }^\circ\text{C}$, a la menor

tasa de respiración del ecosistema predominando metabolismo autótrofo (Valenzuela-Siu *et al.*, 2007), y a la acción mecánica de los vientos que favorece mayor intercambio gaseoso atmósfera-mar, por lo que influyen en los incrementos del oxígeno disuelto. Los vientos en estos meses soplan predominantemente del Noroeste paralelos a la línea de costa (Reyes-Coca *et al.*, 1984) con intensidades frecuentes de $2.5 - 5 \text{ m s}^{-1}$ y eventos con intensidades $> 15 \text{ m s}^{-1}$ (Alcocer-Vázquez, 2019).

En El Soldado, los registros mostraron evidencia de la magnitud de los cambios en la salinidad del agua por efecto de eventos de lluvias y se observaron decrementos específicos en los meses de verano (junio, julio, agosto y septiembre) y esto demuestra las ventajas de trabajar con sensores *in situ* para registrar la influencia de eventos como las lluvias con duración de minutos a horas (Kirchner *et al.*, 2004) y observar la magnitud y duración de la perturbación, en este caso, mediante el comportamiento de la salinidad del agua en el estero.

El funcionamiento de las lagunas costeras en climas áridos es impulsado por el intercambio de agua con el mar adyacente y la intensa evaporación (Mendoza-Salgado *et al.*, 2005) y esto se ajusta a la tendencia general de que la salinidad es alta allí donde la evaporación supera a la precipitación, de tal forma que la variabilidad de la salinidad tiene una fuerte dependencia del balance precipitación- evaporación. En El Soldado, el escaso aporte de agua dulce por lluvias ($< 300 \text{ mm año}^{-1}$), la alta evaporación ($\approx 2,800 \text{ mm año}^{-1}$) y las aguas someras propician que prevalezca alta salinidad > 36 a través del año, como también se ha observado en lagunas costeras de esta región del Golfo de California (Valdez-Holguín, 1994; Arreola-Lizárraga *et al.*, 2016; Ruiz-Ruiz *et al.*, 2017). Estas condiciones de salinidad en el sistema aunado a las temperaturas del agua observadas ayudan a entender los valores de OD, debido a que concentraciones de oxígeno disuelto de equilibrio o saturación (mg L^{-1}) para presión atmosférica estándar al nivel del mar cambian a diferentes temperaturas y salinidades; específicamente, las concentraciones de oxígeno disuelto disminuyen con mayor temperatura y mayor salinidad en el agua, por ejemplo a temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ y salinidad de 30 ups el valor de OD es 7.60 y a salinidad de 40 ups el valor de OD es 7.17; mientras que a temperatura de $30 \text{ }^\circ\text{C}$ y salinidad de 30 ups el valor de OD es 6.39 y a salinidad de 40 ups el valor de OD es 6.05 (Boyd, 2020). Esto es consistente con los valores de temperatura promedio observada en invierno $\sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$ y en verano $\sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ y valores de salinidad > 36 ups a través del año en El Soldado.

Conclusiones

La dinámica del oxígeno disuelto en el estero El Soldado mostró un estado del sistema saludable con valores de oxígeno disuelto promedio diario $> 4 \text{ mg L}^{-1}$ a través del año. Los valores más bajos de OD ($\sim 6 \text{ mg L}^{-1}$) ocurren en julio, agosto y septiembre asociados a valores de temperatura del agua $> 32 \text{ }^\circ\text{C}$ y en este periodo se observan eventos de hipoxia ($< 3 \text{ mg L}^{-1}$), aunque su duración es de horas. Los valores más altos de OD ($> 6 \text{ mg L}^{-1}$) ocurren en invierno y primavera asociados a valores de temperatura del agua $< 20 \text{ }^\circ\text{C}$ y al efecto de los eventos de vientos que soplan del noroeste y que favorecen el intercambio gaseoso entre el mar y la atmósfera y la velocidad de difusión de oxígeno. La salinidad del cuerpo de agua es > 36 ups casi todo el año, y valores más bajos (< 30 ups) se observan en periodos de horas posterior a eventos de lluvias.

Agradecimientos

Al personal directivo y operativo del Área Natural Protegida estero El Soldado por todas las facilidades otorgadas para realizar el estudio. María del Refugio López proporcionó apoyo técnico en el laboratorio de Calidad de Agua (CIBNOR, S.C); David Urías elaboró el mapa del área de estudio (CIBNOR, S.C); Javier Coira proporcionó el mantenimiento de la sonda HYDROLAB (CIBNOR, S.C). Aurora Ávila agradece al CONACyT por la beca (636229) otorgada para realizar estudios de maestría en el CIBNOR, S.C. Este estudio se realizó con recursos fiscales del CIBNOR, S.C.

Literatura citada

- Alcocer-Vázquez, M.D. 2019. *Análisis espacio-temporal de los vientos en la zona núcleo de la circulación monzónica: Sonora, México*. Tesis de Maestría. Universidad de Guadalajara, Guadalajara, México, 106 p.
- Arreola-Lizárraga, J. A., F. J. Flores-Verdugo y A. Ortega-Rubio. 2004. *Structure and litterfall of an arid mangrove stand on the Gulf of California, México*. Aquatic Botany, 79 (2): 137-143.

- Arreola-Lizárraga, J.A., G. Padilla-Arredondo, J. Medina-Galván, L. Méndez-Rodríguez, R. Mendoza-Salgado y M.V. Cordoba-Matson. 2016. *An analysis of hydrobiological responses to anthropogenic and natural influences in a lagoon system in the Gulf of California*. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 45 (1):112-120.
- Best, M. A., A.W. Wither y S. Coates. 2007. *Dissolved oxygen as a physico-chemical supporting element in the Water Framework Directive*. *Marine Pollution Bulletin*, 55: 53–64
- Boyd, C.E. 2020. *Water Quality: an introduction*. Third edition. Springer, Cham, Switzerland, 440 pp.
- Briciu-Burghina, C., T. Sullivan, J. Chapman y F. Regan. 2014. Continuous high-frequency monitoring of estuarine water quality as a decision support tool: a Dublin Port case study. *Environment Monitoring Assessment*, 86(9):5561-5580.
- Brito-Castillo, L., M.A. Crimmins, S.C. Díaz. 2010. *Clima*. pp-73-96. En: F.E. Molina-Freaner y T.R. Van-Devender (eds). *Diversidad Biológica de Sonora*. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- Davies, J. L. 1964. *A morphogenic approach to world shorelines: Zeit fur Geomorphology*, 8:27-42.
- Diaz, R.J. y D.L. Breitburg. 2009. *The hypoxic environment*. *Fish Physiology*, 27: 1-23.
- Filloux, J. H. 1973. *Tidal Patterns and Energy Balance in the Gulf of California*. *Nature*. 243: 217–221.
- García, E. 2004. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 246p.
- Horsburgh, J. S., A. Spackman Jones, D. K. Stevens, D. G. Tarboton y N. O. Mesner. 2010. *A sensor network for high frequency estimation of water quality constituent fluxes using surrogates*. *Environment Modelling & Software*, 25:1031–1044
- Jones, R.C. y A.P. Graziano. 2013. *Diel and seasonal patterns in water quality continuously monitored at a fixed site on the tidal freshwater Potomac River*. *Inland Waters*, 3: 421-436.
- Kirchner, J. W., X. Feng, C. Neal y A.J. Robson. 2004. *The fine structure of water-quality dynamics: the (high-frequency) wave of the future*. *Hydrological Processes*, 18:1353-1359
- Lankford, R. R. 1977. *Coastal lagoons of Mexico: their origin and classification*. pp 182-215. En: Wiley M (ed.). *Estuarine Processes*. Elsevier. New York.
- Mata-Ángeles, J.A., R. Casillas-Hernández, T.M. Ruiz-Ruiz, J.A. Arreola-Lizárraga. 2019. *Estado trófico del estero El Soldado, Sonora, México*. pp 365-370. En: F. Paz, et al. (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2019*. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México.

- Medina-Galván, J., J.M. Audelo-Naranjo y J.A. Arreola-Lizárraga. 2019. *Importancia del monitoreo de procesos biogeoquímicos en lagunas costeras: Área Natural Protegida estero El Soldado como estudio de caso*. Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, 27(77): 12-18.
- Mendoza-Salgado, R. A., C. H. Lechuga-Devéze y A. Ortega-Rubio. 2005. *First approach of a method to assess water quality for arid climate bay in the Gulf of California*. Science of the Total Environment, 347:208-216.
- Nezlin, N.P., K. Kamer, J. Hyde y E.D. Stein. 2009. *Dissolved oxygen dynamics in a eutrophic estuary, Upper Newport Bay, California*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 82:139-151.
- Reyes-Coca, S., E. Pavía-López, J. Candela-Pérez y R. Troncoso-Gaytan. 1984. *Estudio preliminar de las condiciones meteorológicas y climatológicas alrededor del Golfo de California. 1ra. parte: Análisis del viento*. Ciencias Marinas, 10 (2): 9-26.
- Ruiz-Ruiz, T.M., J.A. Arreola-Lizárraga, L. Morquecho, R.A. Mendoza-Salgado, A. Martínez-López, L.C. Méndez-Rodríguez, y J. Enríquez-Flores. 2016. *Assessment of eutrophication in a subtropical lagoon in the Gulf of California*. Aquatic Ecosystem Health and Management, 19 (4): 382-392.
- Ruiz-Ruiz, T.M., J.A. Arreola-Lizárraga, L. Morquecho, L.C. Méndez-Rodríguez, A. Martínez-López, R.A. Mendoza-Salgado. 2017. *Detecting eutrophication symptoms by means of three methods in a subtropical semi-arid coastal lagoon*. Wetlands, 37:1105-1118.
- Santana, R., G. C. Lessa, J. Haskins y K. Wasson. 2018. *Continuous Monitoring Reveals Drivers of Dissolved Oxygen Variability in a Small California Estuary*. Estuaries and Coasts, 41 (1): 99-113.
- Valdez-Holguín, J. E. 1994. *Variaciones diarias de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y clorofila a, en una laguna hipersalina del Golfo de California*. Ciencias Marinas, 20: 123-137
- Valenzuela-Siu, M., J. A. Arreola Lizárraga, S. Sánchez Carrillo y G. Padilla Arredondo. 2007. *Flujos de nutrientes y metabolismo neto de la laguna costera Lobos, México*. Hidrobiológica. 17 (3): 193-208.

Cita:

Ávila-García, A., J.A. Arreola-Lizárraga, R.H. Barraza-Guardado, L. Brito-Castillo y E. Alcántara-Razo. 2023. *Dinámica del oxígeno disuelto en el agua del estero El Soldado: un sistema prístino semi-árido subtropical*. Áreas Naturales Protegidas SCRIPTA, 2023. Vol. 9 (3):49-59. <https://doi.org/10.18242/anpscripta.2023.09.09.03.0004>

Sometido: 20 de abril de 2020

Revisado: 13 de mayo de 2020

Aceptado: 4 de noviembre de 2020

Editor asociado: Dr. Martin Villa Ibarra

Diseño gráfico editorial: Lic. Gerardo Hernández