

Variabilidad espacio temporal de la zona eufótica en Bahía de Banderas

Seasonal and spatial variability of the euphotic zone in Bahía de Banderas

Esmeralda Morales-Domínguez¹, León Felipe Álvarez-Sánchez², Luis Eduardo Calderón-Aguilera¹ 

Recibido: 31 de octubre de 2022.

Aceptado: 05 de abril de 2023.

Publicado: agosto de 2023.

RESUMEN

Antecedentes. La zona eufótica (ZEU) es la sección más superficial de la columna de agua donde la radiación solar es suficiente para producir fotosíntesis. La profundidad *in situ* se mide usando sondas perfiladoras de la luz, pero también se puede monitorear utilizando percepción remota. **Objetivo.** Determinar la variabilidad temporal y espacial de la zona eufótica (ZEU) de Bahía de Banderas y su relación con otras variables que contribuyen a la turbidez. **Métodos.** Se utilizaron distintas fuentes de datos (OceanColor, Copernicus, NOAA, CONAGUA), para obtener series de tiempo (2003 al 2020) de materia inorgánica particulada (MIP), Clorofila-*a* (Chl-*a*), coeficiente de atenuación difusa a 490 nm (Kd490), profundidad del disco de Secchi (ZSD), ZEU, precipitación diaria y nivel hídrico de los ríos Ameca y Pitillal, se hizo un análisis de correlación entre estas variables. A partir de lo anterior, se realizó un análisis de conglomerados para determinar si existen diferencias espaciales en la bahía, así como diagramas de dispersión para observar las tendencias entre los parámetros ambientales. Se realizaron dos mapas estacionales (lluvias y secas) con base a las medianas climáticas de ZEU y a las corrientes geostroficadas predominantes. **Resultados.** La profundidad de la zona eufótica (ZEU) fue mayor de junio a agosto (48.54 ± 21.93 m) y menor de febrero a abril (22.95 ± 12.98 m); el análisis de conglomerado determinó que la bahía se divide en dos áreas: la norte cuya ZEU es más somera (mayor correlación con la MIP y Chl-*a*), y la sur, donde es más profunda (mayor correlación con la Chl-*a*). **Conclusiones.** El parámetro que tiene mayor efecto sobre la profundidad de la ZEU es la Chl-*a*, y solamente el área más cercana a la desembocadura de los ríos Ameca y Pitillal presenta relación inversa entre la ZEU con la MIP y la Chl-*a*.

Palabras clave: clorofila-*a*, materia inorgánica, oceanografía satelital, transparencia del agua, turbidez.

ABSTRACT

Background. The euphotic zone (EUZ) is the most superficial section of the water column where solar radiation is sufficient to produce photosynthesis. In situ depth is measured using light profiler probes but can also be monitored using remote sensing. **Objective.** To determine the temporal and spatial variability of Bahía de Banderas Euphotic Zone (EUZ) and its relationship with other variables that contribute to turbidity. **Methods.** Different data sources (OceanColor, Copernicus, NOAA, CONAGUA) were used to obtain time series (2003 to 2020) of particulate inorganic matter (PIM), Chlorophyll-*a* (Chl-*a*), diffuse attenuation coefficient at 490 nm (Kd490), depth of the Secchi disk (ZSD), ZEU, daily precipitation and water level of the Ameca and Pitillal rivers and a correlation analysis was made between these variables, and a cluster analysis to determine if there are spatial differences in the bay, as well as scatter plots to observe trends among environmental parameters. Two seasonal maps (rainy and dry season) were drawn based on the climatic medians of ZEU and the prevailing geostrophic currents. **Results.** The euphotic zone (EUZ) was deeper from June to August (48.54 ± 21.93 m) and shallower from February to April (22.95 ± 12.98 m); the cluster analysis determined that the bay is divided into two areas: the north, whose ZEU is shallower (higher correlation with MIP and Chl-*a*), and the south, where it is deeper (higher correlation with Chl-*a*). **Conclusions.** The parameter that has the greatest effect on the depth of the ZEU is the Chl-*a*, and only the area closest to the mouth of the Ameca and Pitillal rivers presents an inverse relationship between the ZEU with the MIP and the Chl-*a*.

Keywords: Chlorophyll-*a*, inorganic matter, satellite oceanography, water transparency, turbidity.

¹ Departamento de Ecología Marina, División de Oceanología, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. Carretera Tijuana-Ensenada 3918, Zona Playitas, Ensenada, Baja California, 22860. México

² Unidad de informática Marina, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México, 04510. México

***Corresponding author:**

Luis Eduardo Calderón Aguilera: e-mail: leca@cicese.mx

To quote as:

Morales-Domínguez, E., L. F. Álvarez-Sánchez & L. E. Calderón-Aguilera. 2023. Variabilidad espacio temporal de la zona eufótica en Bahía de Banderas. *Hidrobiológica* 33 (2): 211-222.

DOI:10.24275/RZPR6531

INTRODUCCIÓN

La zona eufótica (ZEU) es la sección más superficial de la columna de agua, en donde la cantidad de radiación solar es suficiente para producir fotosíntesis. La ZEU puede presentarse desde los 15 m en aguas costeras, aumentar a los 40 m en plataformas continentales y llegar hasta los 200 m en océano abierto (Wright & Colling, 1995). Estas diferencias están relacionadas con la transparencia de la columna de agua (Ryding & Rast, 1989), que a su vez está influenciada por la cantidad de partículas suspendidas (Lonin, 1997).

La ZEU se ha medido *in situ* empleando sondas perfiladoras de luz lo cual permitió establecerla como la profundidad donde la radiación fotosintéticamente disponible es $\geq 1\%$ con respecto a la superficie (Lalli & Parsons, 1997). De manera *ex situ* se mide usando percepción remota, herramienta útil por su bajo costo y permite realizar estudios a escalas locales, regionales y globales (Candela *et al.*, 2021; Ouellette & Getinet, 2016). Por su versatilidad, la percepción remota también se ha empleado para analizar la calidad del agua (Wu *et al.*, 2009; Hamidi *et al.*, 2017), radiancia y reflectancia de la luz, temperatura del mar, velocidad de corriente (Cerdeira-Estrada & López-Saldaña, 2011), detritos suspendidos (González-Luna *et al.*, 2019) y florecimientos algales (Gómez-Villarreal *et al.*, 2008).

Los productos de información oceanográfica generados a partir de las imágenes de satélites (ej. sensor MODIS) generan datos de diversas variables ambientales: El coeficiente de atenuación difusa a 490 nm (Kd490), la temperatura superficial del mar, la concentración de clorofila-*a* (Chl-*a*), entre otras (Parkinson, 2003). En el presente estudio se eligieron las variables Kd490 (proporciona información de la turbidez de los cuerpos de agua en relación con el fitoplancton y la materia flotante) y la ZEU (se calcula a partir de los coeficientes de absorción y retrodispersión en la longitud de onda de 490 nm (Lee *et al.*, 2007)). Estas variables se utilizan para el monitoreo de procesos eutróficos.

Otras fuentes de información útiles de información ambiental son el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (nivel hídrico) y el Sistema Nacional de Información del Agua (estadísticas para cuencas hidrológicas), ambas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), y los modelos matemáticos del Servicio de Vigilancia Marina de la Comunidad Europea (CMEMS).

Conocer la ZEU es relevante por que proporciona un índice de la calidad del agua, por su relación con la claridad del agua y la producción primaria (Behrenfeld & Falkowski, 1997). Debido a que la luz solar decrece con la profundidad, los primeros metros son los más propicios para la producción primaria (Kirk, 2011). Sin embargo, la zona somera puede ser hostil para comunidades bénticas (p. ej. arrecifes coralinos) porque está expuesta a perturbaciones antropogénicas (p. ej. pesca y contaminación costera), procesos ambientales (p. ej. oleaje severo causado por eventos hidrometeorológicos) y los efectos del cambio climático (Carriquiry & Reyes-Bonilla, 1997).

Debido a las dificultades mencionadas anteriormente, la *hipótesis del refugio profundo* (Glynn, 1996) plantea que algunas especies han migrado a zonas más profundas (p. ej. zona mesofótica) y se han adaptado a condiciones de poca disponibilidad de luz. La zona mesofótica se extiende aproximadamente desde los 30 a los 150 m de profundidad (Hinderstein *et al.*, 2010), o bien donde ocurre el 50% de intensidad de la luz con respecto a la superficie, y la profundidad que alcanza

depende de la transparencia del agua (Rodríguez-Escobar & Calderón Aguilera, 2021).

Bahía de Banderas se localiza en el centro occidente del Pacífico mexicano y tiene una extensión de 102 km (IIEG 2021). Recibe el aporte de varios efluentes, principalmente de los ríos Ameca y Pitillal que en conjunto presentan un volumen medio anual de escurrimiento de 316.06 hm³ (SINA, 2022). Particularmente, para la región de Bahía de Banderas se ha registrado un promedio de precipitación anual de 1,534 mm (Fig. 1) (Cupul-Magaña, 1998). A pesar de la cantidad de agua y sedimentos que drenan hacia Bahía de Banderas, no se han estudiado los factores *ex situ* que influyen en la profundidad de la ZEU. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue determinar la variabilidad espacial y temporal de la ZEU en Bahía de Banderas y su relación con las variables que contribuyen a la turbidez de la bahía, utilizando datos satelitales y bases de datos ambientales de acceso libre. Este trabajo proporciona información complementaria para estudiar los arrecifes mesofóticos de Bahía de Banderas.

Se hipotetiza que la profundidad de la ZEU presentará variaciones espaciales y temporales dentro de Bahía de Banderas, y estará relacionada con variables como la transparencia del agua (Kd490), la materia inorgánica particulada, el nivel hídrico de los ríos y la cantidad de lluvia en la región.

MÉTODOS

Área de estudio: Bahía de Banderas se encuentra entre Nayarit y Jalisco, y tiene 1,407 km² de área. En la bahía convergen cinco cuencas hidrográficas: Tecomala, Cuale, Pitillal, Ameca Ixtapa B y Huicicila, que en conjunto presentan un volumen medio anual de escurrimiento natural de 1,062.6 hm³ (SINA, 2022). Los ríos Ameca y Pitillal son los dos ríos en Bahía Banderas que cuentan con estaciones hidrométricas (CONAGUA, 2022).

El río Ameca forma parte de la cuenca hidrológica Ameca-Pijinto, con una descarga anual de 977.38 millones de metros cúbicos (Mm³) de agua (DOF, 2013, 2018), además que es el principal subsidiario de sedimentos hacia Bahía de Banderas, lo que permite la formación y renovación de playas en su región norte (Cupul-Magaña, 1998). El río Pitillal forma parte de la cuenca hidrológica Pitillal, con una descarga anual de 75.38 Mm³ de agua, y es el principal cuerpo de agua de esta cuenca (DOF, 2013, 2018).

Variables oceanográficas: Se obtuvieron los productos satelitales Kd490 y ZEU del sitio OceanColor WEB con una resolución espacial de 4 km y temporal diaria (Lee, 2005). Esta información se completó con los productos de concentración de Chl-*a* (Gohin *et al.*, 2002; Hu *et al.*, 2012; Xi *et al.*, 2021), materia inorgánica particulada (MIP) y profundidad del modelo predictivo del disco de Secchi (ZSD) (modelo basado en observaciones satelitales del sensor MODIS, ajustado y validado con base en 108,323 observaciones *in situ* registradas por el Centro Nacional de Datos Oceanográficos de Estados Unidos; Gohin, 2011), provenientes del CMEMS, con resolución espacial de 4 km y temporal diaria.

El nivel hídrico para los ríos Pitillal y Ameca se obtuvieron de las estaciones hidrológicas de la CONAGUA. Finalmente, los valores de precipitación se obtuvieron de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), con resolución espacial de 0.5° y temporal diaria. Estos valores fueron ajustados a la resolución de los productos sateli-

tales MODIS Aqua (4 km) utilizando la función *extract* (método bilineal, librería “raster” Hijmans, 2022). Los datos se procesaron con R Studio v.4.2.2 (R Core Team, 2022).

Los datos se estructuraron en una matriz espacio-temporal con 57 posiciones geográficas, 8,862 días (01/01/2003 a 31/12/2020) y ocho variables ambientales. Los datos ambientales de todos los años se promediaron por mes para obtener las normales climáticas mensuales.

Adicionalmente, se elaboró un mapa para ilustrar las diferencias en la distribución espacial de la ZEU y las corrientes superficiales geográficas (CSG), durante los meses de condiciones de sequía (enero-mayo, noviembre-diciembre) y lluvias (junio-octubre), calculando la mediana por píxel (librería “raster” Hijmans, 2022). Las CSG se obtuvieron como componentes verticales y horizontales del CMEMS en resolución espacial de 1/12°. Estos componentes se disgregaron espacialmente con un factor de 5 x 5 por píxel (librería “raster” Hijmans, 2022). La velocidad y la dirección de las CSG fueron determinados a partir de los componentes de dirección por la herramienta “vectores de gradiente de componentes direccionales” del software SAGA GIS (Conrad *et al.*, 2015).

Análisis estadísticos: Para determinar diferencias significativas entre las variables ambientales en un ciclo anual, se empleó un análisis de varianza de una vía (ANOVA, nivel de significancia 0.05, Chambers *et al.*, 1992). El grado de correlación entre las variables y el nivel de significancia, se estableció mediante el método de Spearman (Best & Roberts, 1975) empleando las librerías “Hmisc” (Harrell, 2022), “psych” (Revelle, 2022) y “corrplot” (Wei & Simko, 2021).

Para determinar la variabilidad espacial de la ZEU en la bahía, se realizó un análisis de conglomerados (Cluster, McQuitty, 1966) empleando una matriz de distancia Euclidiana (Borg & Groenen, 2005) de la serie de tiempo de la ZEU por píxel, calculando el número de clústeres óptimo a través del método del valor de Silhouette (Rousseeuw, 1987).

La comparación de tendencias lineales entre pares de variables se realizó a partir de dos diagramas de dispersión (Becker *et al.*, 1988), cada uno de ellos con base en la clasificación de los píxeles obtenida en el análisis de Cluster.

RESULTADOS

Se obtuvo una matriz de 395,580 datos condensando 57 píxeles en el área de estudio que representan una temporalidad de 6,939 días de información (Fig. 1). Las variables ambientales ZEU, ZSD, Kd490, Chl-*a*, MIP, Precipitación, Nivel Pitillal, Nivel Ameca presentaron una variabilidad significativa a lo largo del año ($p < 0.05$; Tabla 1).

La ZEU fue mayor en los meses de junio, julio y agosto (48.54 ± 21.93 m), en comparación con los meses de febrero, marzo y abril donde fue más somera (22.95 ± 12.98 m); mientras que la profundidad del ZSD fue mayor en los meses de julio y agosto (13.43 ± 6.13 m), contrastando con los meses de febrero a mayo, donde las profundidades fueron las más someras (5.07 ± 3.48 m; Fig. 2).

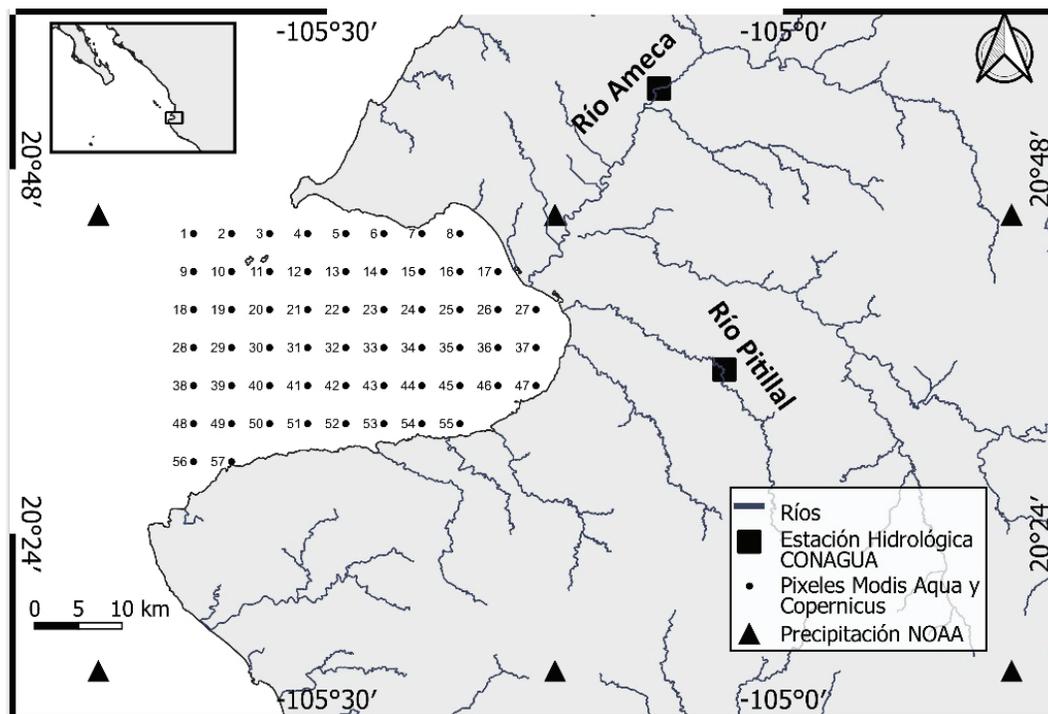


Figura 1. Localización de los puntos de obtención de datos en Bahía de Banderas. Píxeles del sensor MODIS Aqua y del modelo de Copernicus en el área de estudio (●), localización de las estaciones hidrológicas de la CONAGUA en los ríos Ameca y Pitillal (■), y píxeles de precipitación de la NOAA (▲)

Tabla 1. Estadísticos del ANOVA de una vía de las variables ambientales.

Variable	F	p	Valores máximos y mínimos
ZEU	(11,100353) = 3347	< 0.05	0-163.6 m
ZSD	(11,266181) = 12289	< 0.05	1.32 a 37.42 m
Kd490	(11,366437) = 10093	< 0.05	0.03 a 1.29 m ⁻¹
Chl- <i>a</i>	(11,266209) = 4043	< 0.05	0.06 a 65 mg m ⁻³
MIP	(11,247241) = 842.8	< 0.05	0.05 a 100 g m ⁻³
Precipitación	(11,20805) = 452	< 0.05	0-143.9 mm
Nivel hídrico Pitillal	(11,328913) = 70631	< 0.05	0 a 2.6 m
Nivel hídrico Ameca	(11,372986) = 50.74	< 0.05	0 a 7 m

ZEU = zona eufótica, ZSD = profundidad del disco de Secchi, Kd490 = coeficiente de atenuación difusa, Chl-*a* = concentración de clorofila-*a*, MIP = materia inorgánica particulada.

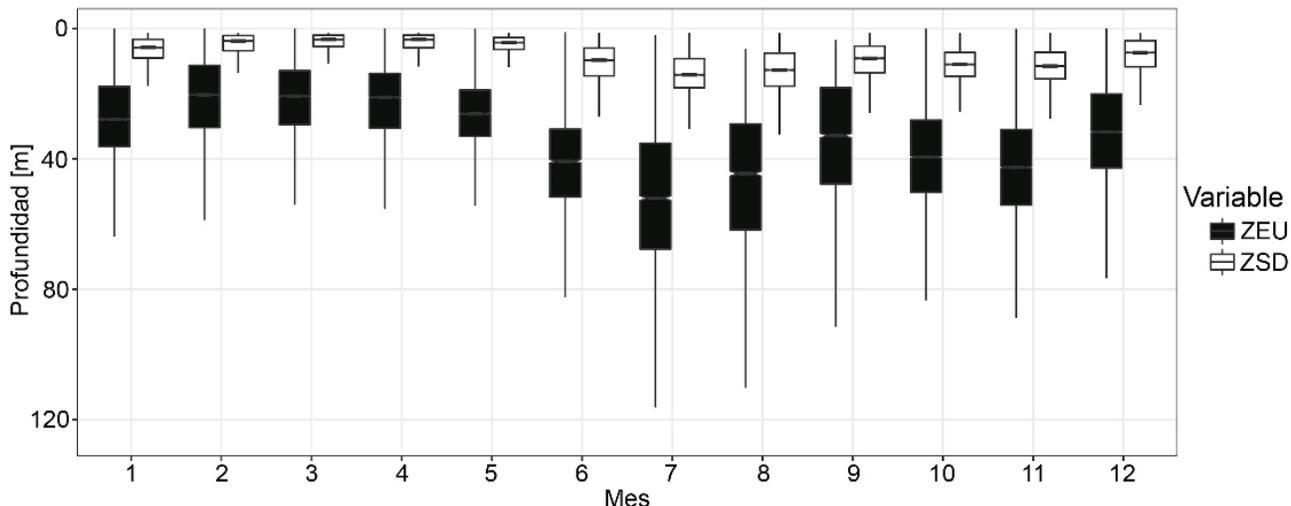


Figura 2. Variabilidad mensual promedio de la zona eufótica (ZEU) y de la profundidad del disco de Secchi (ZSD) en Bahía de Banderas del 2003 al 2020 (cuartiles entre 25% y 75% de los datos).

Los valores de Kd490 indicaron mayor de turbidez del agua marina en los meses de enero a mayo ($0.22 \pm 0.17 \text{ m}^{-1}$), y menor turbidez de julio a noviembre ($0.09 \pm 0.06 \text{ m}^{-1}$; Fig. 3a).

El promedio mensual de la concentración de Chl-*a* fue mayor en los meses de febrero a mayo ($5.94 \pm 7.09 \text{ mg m}^{-3}$), mientras que los meses de julio y agosto presentaron los valores más bajos ($1.05 \pm 2.01 \text{ mg m}^{-3}$; Fig. 3b). La MIP presentó los valores promedio más altos en el mes de septiembre ($2.53 \pm 4.52 \text{ g m}^{-3}$) y los menores en el mes de noviembre ($0.63 \pm 0.68 \text{ g m}^{-3}$; Fig. 3c). La precipitación se presenta en los meses de junio a octubre, siendo el mes de septiembre el de mayor intensidad ($12.75 \pm 17.05 \text{ mm}$; Fig. 3d).

Los ríos Ameca y el Pitillal presentaron una tendencia anual similar en su nivel hídrico, registrándose los valores más bajos durante mayo

(Ameca: $3.29 \pm 0.82 \text{ m}$, Pitillal: $0.39 \pm 0.08 \text{ m}$) y los más altos durante septiembre (Ameca: $4.37 \pm 5.01 \text{ m}$, Pitillal: $1.18 \pm 0.24 \text{ m}$; Fig. 4).

Se observan coeficientes de correlación robusta y directa ($\rho > 0.9$), entre la Chl-*a* y el Kd490 ($\rho = 1$), así como entre la ZEU y la ZSD ($\rho = 0.94$). También se pueden destacar las correlaciones altas ($0.5 < \rho < 0.9$) entre la Chl-*a* y la MIP (0.6) y la Kd490 y la MIP (0.6).

Los coeficientes de correlación robusta e inversa ($\rho < -0.9$), se presentaron entre la ZSD y la Kd490 ($\rho = -1$), la ZSD con la Chl-*a* ($\rho = -1$), la ZEU con la Chl-*a* (-0.94), y la ZEU con la Kd490 (-0.94). Las correlaciones altas e inversas ($-0.5 > \rho > -0.9$) se presentaron entre la ZSD con la MIP (-0.6), la ZEU y la MIP (-0.6), la Chl-*a* y el nivel hídrico Pitillal (-0.51), y el Kd490 nivel hídrico Pitillal (-0.51). El resto de las correlaciones fueron más débiles (Fig. 5).

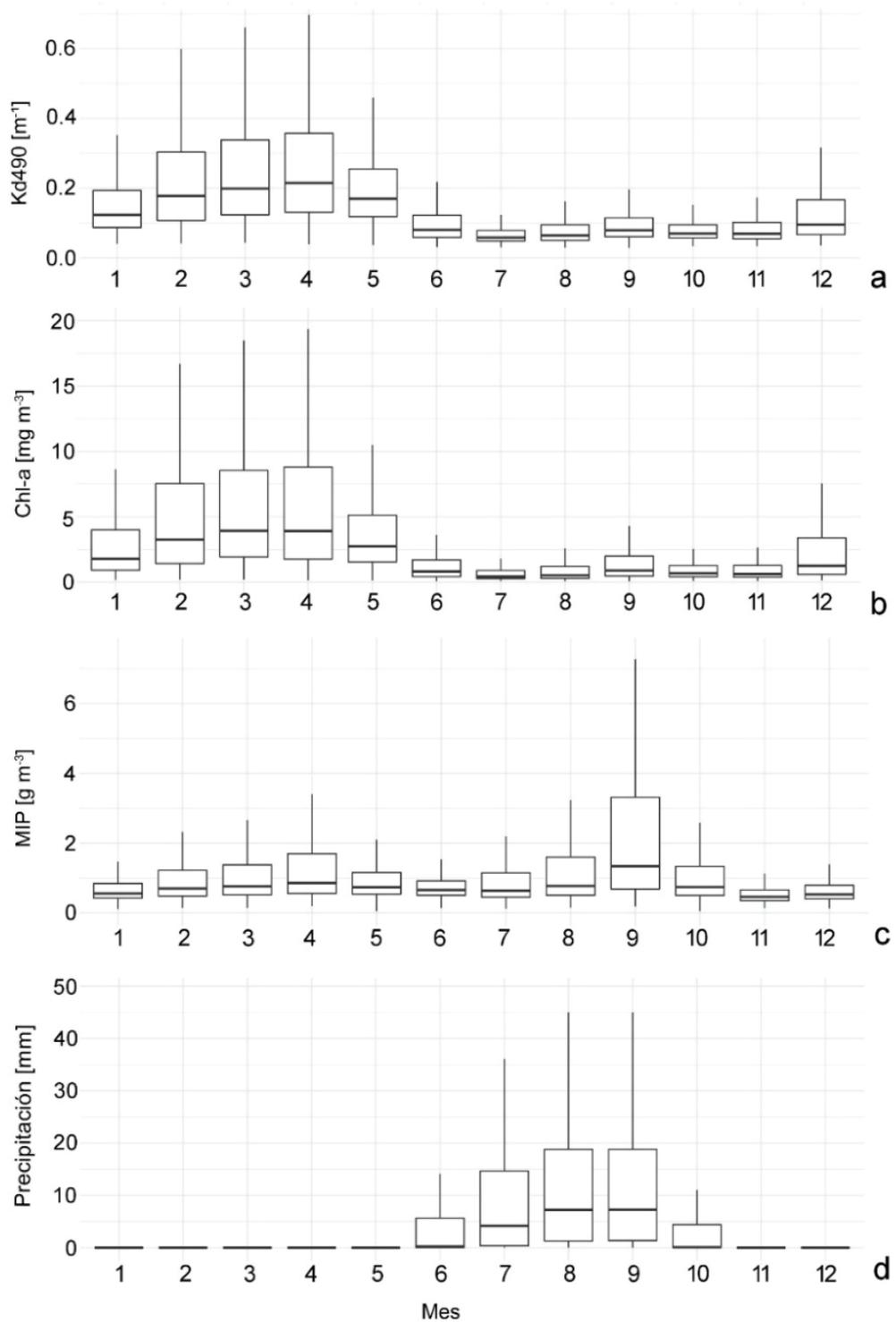


Figura 3. Variabilidad mensual promedio de: a) coeficiente de atenuación (Kd_{490} [m^{-1}]), b) concentración de clorofila-a ($Chl-a$ [$mg\ m^{-3}$]), c) concentración de la materia inorgánica particulada (MIP [$g\ m^{-3}$]), d) precipitación [mm], en Bahía de Banderas del 2003 al 2020 (cuartiles entre 25% y 75% de los datos).

El número óptimo de clústeres obtenido por el valor de Silhouette fue de 2, y el análisis de conglomerados realizado sobre la ZEU mostró que Bahía de Banderas se divide en dos áreas: la primera fue representada por píxeles cercanos a la costa norte y la segunda por píxeles pertenecientes a la costa sur (Fig. 6).

Los diagramas de dispersión indican que la ZEU en Bahía de Banderas disminuye cuando hay mayor concentración de Chl-*a* y cuando hay presencia de MIP. Este último factor mantiene relación positiva con el aumento en el nivel hídrico del río Ameca localizado en el área norte (Fig. 7); sin embargo, al alejarse del área de la desembocadura (área sur), se pierde la correlación entre el nivel hídrico de los ríos Ameca y Pitillal con la concentración de MIP (Fig. 8). Durante la temporada de secas, las corrientes geostróficas en el interior de la bahía ocurren en dirección sur (velocidad 5.8 ± 2 cm/s), y se observa una distribución homogénea y más somera de la ZEU (Fig. 9A), mientras que durante la temporada de lluvias las corrientes geostróficas tienen dirección norte y noreste (velocidad 6.3 ± 3.6 cm/s), quedando la costa sur con una ZEU más profunda (40 a 50 m) que contrasta con la costas norte y noreste donde es más somera (10 a 20 m) (Fig. 9B).

DISCUSIÓN

En Bahía de Banderas, González-Luna *et al.* (2019) reportan que la mayor turbidez (ocasionada por detritos suspendidos) se presenta durante la temporada de lluvias, principalmente en los meses de julio a septiembre, y se deriva de la pluma generada por los terrígenos acarreados por la corriente fluvial hacia la bahía. Por el contrario, en este estudio se observa que el pico de mayor turbidez y menor espesor de la ZEU se presenta en el mes de abril, mientras que la ZEU se hace más profunda a inicio de la temporada de lluvias (junio a agosto; Fig. 2). Esta diferencia puede deberse a que el Kd490 registra la atenuación de la luz por materia inorgánica particulada en la superficie y por pigmentos como la clorofila-*a*, lo cual sugiere que tanto aportes de ríos como florecimientos algales tienen una acción directa sobre la profundidad de la ZEU.

Por otra parte, los máximos de clorofila-*a* ocurren durante los meses de diciembre a mayo, lo cual coincide con la presencia de florecimientos algales en la zona, cuyos valores máximos se han registrado en los meses de invierno-primavera de la región (Gómez-Villarreal *et al.*, 2008). Estos eventos se han atribuido a la acción de surgencias (Fiedler, 1992), que hacen emerger nutrientes del fondo marino propiciando la proliferación del fitoplancton a lo largo de la zona costera, así como su transporte al interior de la bahía desde costas contiguas (Zamudio *et al.*, 2002; Lavín *et al.*, 2006).

Considerando que en Bahía de Banderas los picos de turbidez registrados por el sensor satelital son mayores en época de secas, y que existe una correlación positiva con la concentración de clorofila-*a* durante estos meses, es posible que la presencia de fitoplancton impida la penetración de la luz solar hacia la columna de agua en mayor magnitud que las plumas de los ríos, a pesar del aumento del caudal y su consecuente pluma en época de lluvias.

Por otra parte, los diagramas de dispersión agruparon a dos zonas en Bahía de Banderas (Fig. 6). Un área definida por la costa norte, en donde la variabilidad de la ZEU y Kd490 se asocia con la MIP, la precipitación, el nivel hídrico de los ríos y la Chl-*a* (Fig. 7). La segunda área se agrupó al sur, en donde la turbidez del agua se relaciona solamente con la Chl-*a* (Fig. 8). Esta división entre las áreas norte y sur de la bahía también fue señalada por Cortés-Lara *et al.* (2004), quienes realizaron muestreos con disco de Secchi e identificaron el área norte como una costa con baja transparencia del agua, y el área sur con mayor transparencia, lo que coincide con el presente trabajo.

Los patrones de las CSG durante la época de lluvia (Fig. 9B) que van de sur a norte concuerdan con lo indicado por González-Luna *et al.* (2019) y este movimiento propicia la concentración de MIP en las costas norte y este, especialmente en época de lluvias (Cortés-Lara *et al.*, 2004). Por otra parte, las CSG que ocurren en temporada de secas, sugieren que las CSG contribuyen a dispersar la concentración de Chl-*a* en toda la bahía, lo cual podría explicar que la mayor parte de la bahía presenta valores someros de la ZEU (Fig. 9A).

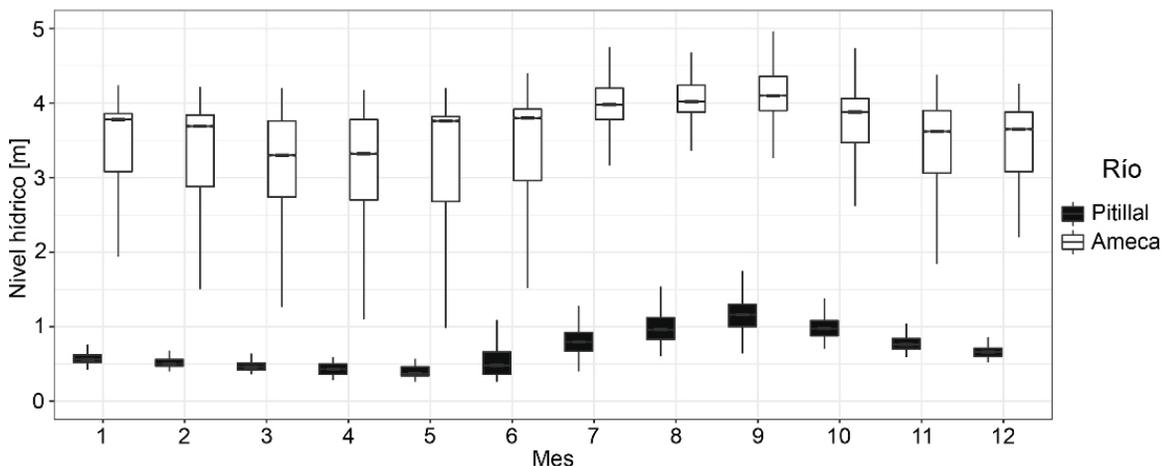


Figura 4. Variabilidad en el nivel hídrico del río Pitillal y del río Ameca (m), del 2003 al 2020 (cuartiles entre 25% y 75% de los datos).

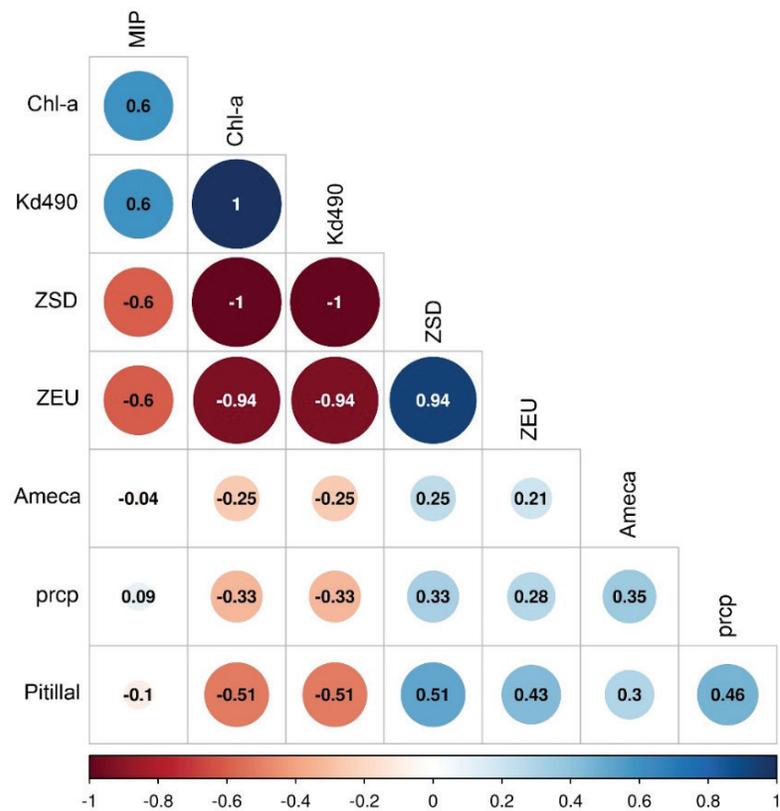


Figura 5. Correlación entre las variables concentración de la materia inorgánica particulada (MIP), clorofila-a (Chl-a), coeficiente de atenuación difusa (Kd490), profundidad de disco de Secchi (ZSD), zona eufótica (ZEU), nivel hídrico del río Ameca, precipitación diaria (prcp) y nivel hídrico del río Pitillal.

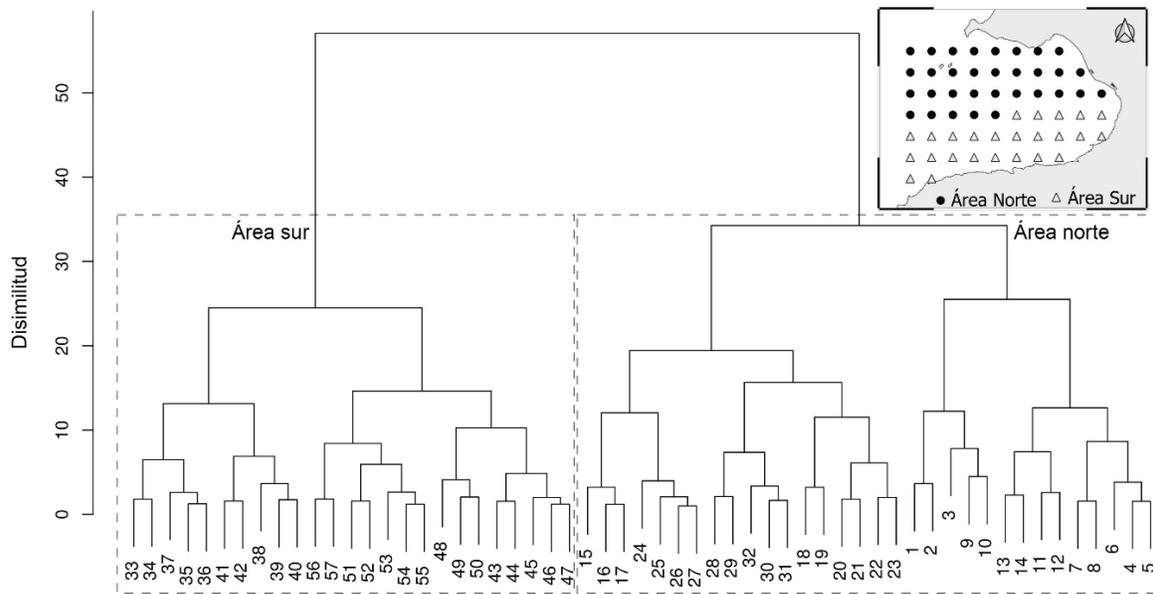


Figura 6. Análisis de conglomerados realizado sobre la ZEU. Los píxeles de Bahía de Banderas se agruparon en una zona representada por píxeles cercanos a la costa norte y una segunda zona por píxeles pertenecientes a la costa sur.

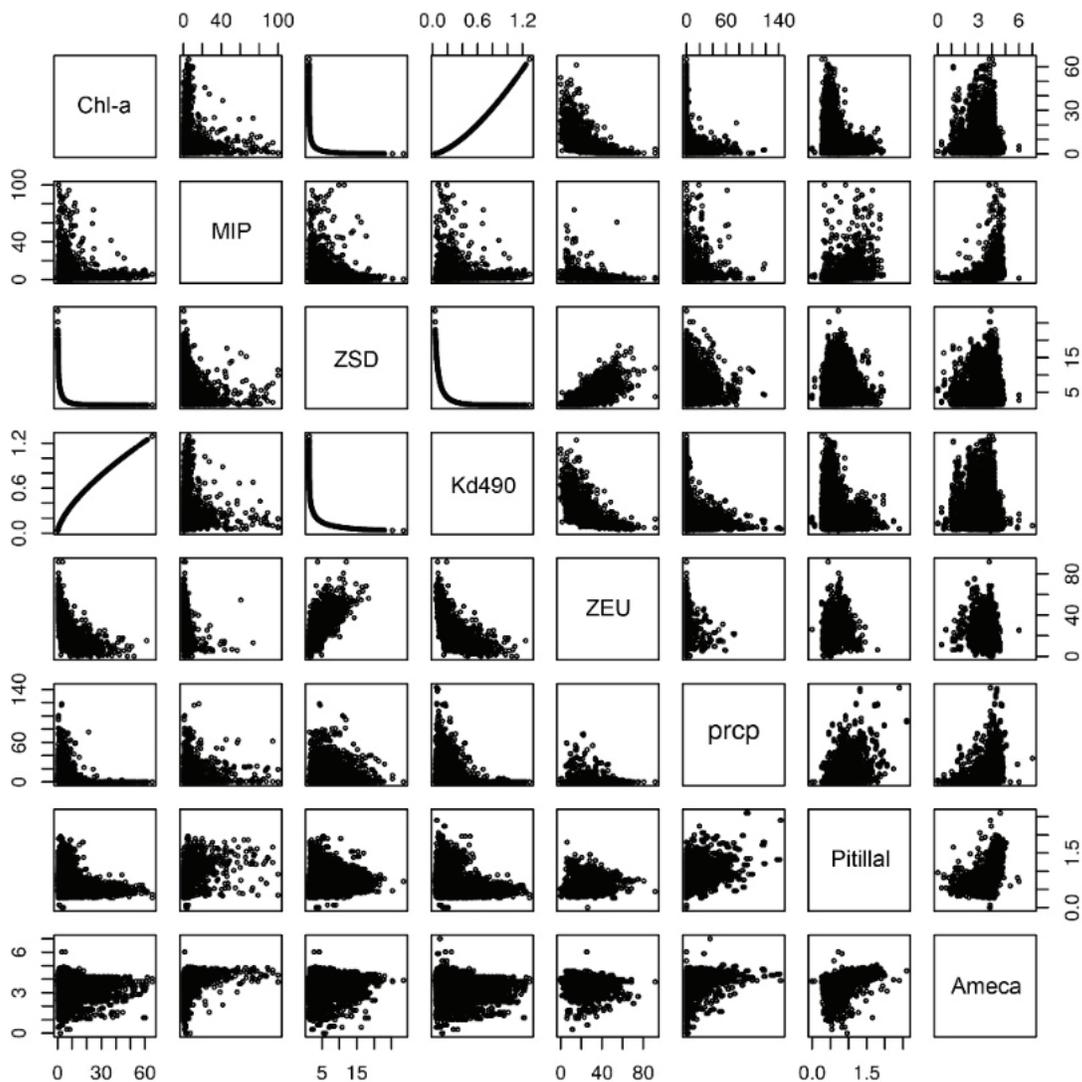


Figura 7. Diagrama de dispersión entre las variables ambientales en el área norte de Bahía de Banderas. Concentración de clorofila-*a* (Chl-*a*), materia inorgánica particulada (MIP), profundidad del disco de Secchi (ZSD), coeficiente de atenuación difusa (Kd490), zona eufótica (ZEU), precipitación diaria (prcp), nivel hídrico del río Pitillal y nivel hídrico del río Ameca.

Aunque los datos no permitieron estimar la zona mesofótica, se puede inferir que esta zona es más profunda en la parte sur de la bahía debido a que la luz penetra a profundidades mayores en esta área, mientras que en el norte de la bahía es somera, debido a la presencia de la MIP y la Chl-*a*. Por lo tanto, se sugiere realizar estudios *in situ* para determinar la profundidad de la zona mesofótica en Bahía de Banderas.

La percepción remota es una herramienta útil y de bajo costo para el estudio a largo plazo de regiones marinas, como es el caso de Bahía de Banderas. Sin embargo, se debe considerar que al ser un medio de detección *ex situ* tiene algunas limitantes, ya que los datos que registra pueden variar por efecto de factores como la humedad atmosférica, la posición del sol y el albedo, así como a la adecuación de los algoritmos a las condiciones específicas de una región (Kirk, 2011). Cervan-

tes-Duarte *et al.* (1993) consideran que una región con baja cobertura de nubes y con atmósfera seca la mayor parte del año es adecuada para llevar a cabo estudios con sensores remotos. Se observó que en Bahía de Banderas se obtuvieron imágenes con limitaciones en la calidad, por factores atmosféricos; no obstante, la periodicidad de las imágenes de satélite permite generar datos de aproximadamente 20 años.

Asimismo, una desventaja de los algoritmos que los satélites emplean para su determinación es que pueden mostrar resultados distintos dependiendo de las condiciones de penetración de luz específicas de un sitio. Lee *et al.* (2007) determinaron que para para aguas tipo I (mar abierto), el cálculo de la ZEU satelital se estima mejor cuando la profundidad fotosintéticamente activa (PAR) al 1% medida *in situ* se establece a profundidades mayores a los 30 m, pero sobreestima

aquellas zonas con aguas turbias (aguas tipo 2), en donde la profundidad registrada para el PAR al 1% es menor a 30 m. Esto impone una limitante con respecto a la precisión de los valores de la ZEU en aguas costeras (catalogadas como tipo 2). No obstante, la información obtenida por medio de productos satelitales es valiosa en lugares donde no se han realizado estudios a largo plazo de la ZEU, como es el caso de Bahía de Banderas, al constituir una aproximación a las tendencias y patrones espaciotemporales de las condiciones de luz al interior de estos cuerpos de agua. Si a futuro se desea tener una mayor precisión en el registro de la ZEU satelital en Bahía de Banderas, se sugiere complementar los datos *ex situ* con datos *in situ* del PAR en perfiles verticales para ajustar el algoritmo de determinación de la ZEU.

En conclusión, los datos satelitales indican que la ZEU en Bahía de Banderas se ve afectada en mayor medida por la presencia de fito-

plancton, y la ZEU más profunda se presenta en los meses de lluvia. Adicionalmente, los datos indican que hay una división entre el área norte y sur de la bahía con respecto a la profundidad de la ZEU. En el área norte hay presencia de MIP durante la época de lluvias, lo cual corresponde con que en esta zona se encuentran las desembocaduras de los ríos Pitillal y Ameca. Este trabajo marca el precedente del uso de productos satelitales para el estudio a escala local de la ZEU y las variables que contribuyen a la turbidez del agua. Los productos satelitales como la ZEU abren la posibilidad de realizar estudios y monitoreos continuos a largo plazo; no obstante, datos *in situ* podrían mejorar sustancialmente los resultados aquí presentados, permitiendo entender mejor la dinámica de la ZEU, y así contribuir con estudios de la zona mesofótica y de las comunidades bentónicas que aquí se encuentran, particularmente los arrecifes mesofóticos.

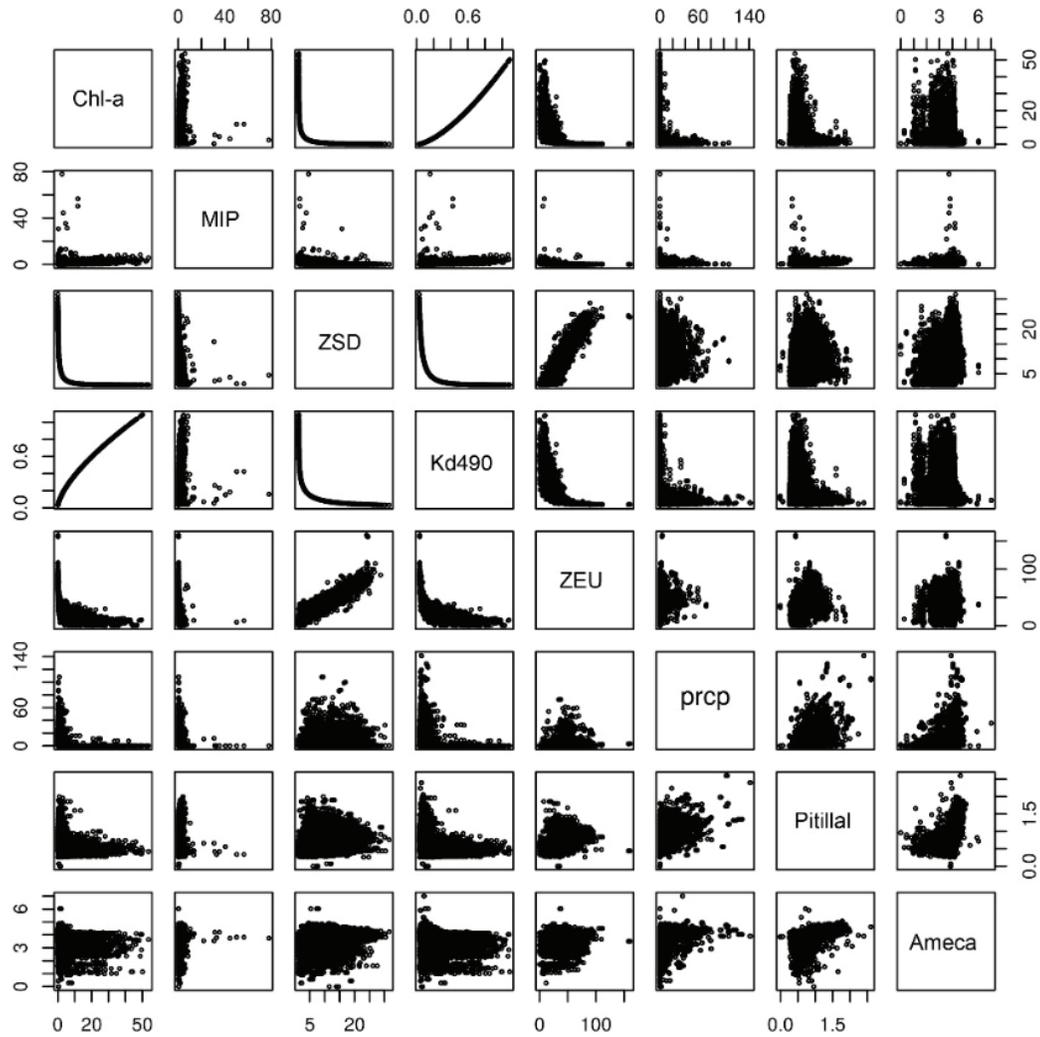


Figura 8. Diagrama de dispersión entre las variables ambientales en el área sur de Bahía de Banderas. Concentración de clorofila-a (Chl-a), materia inorgánica particulada (MIP), profundidad del disco de Secchi (ZSD), coeficiente de atenuación difusa (Kd490), zona eufótica (ZEU), precipitación diaria (prcp), nivel hídrico del río Pitillal y nivel hídrico del río Ameca.

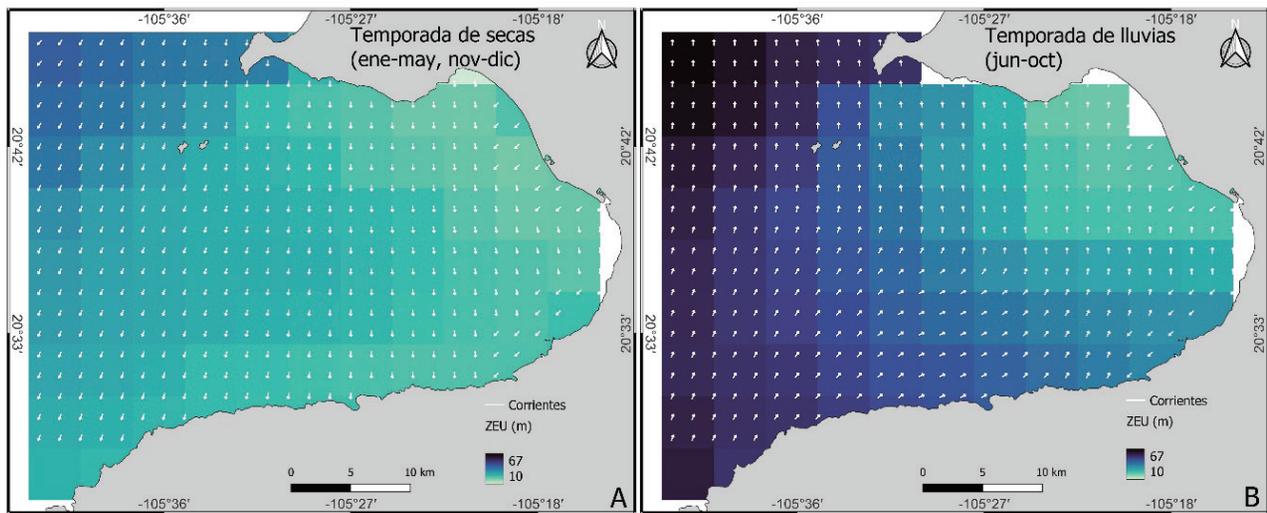


Figura 9. Mapa de la distribución espacial de la Zona eufótica (ZEU) en Bahía de Banderas: A) Temporada de secas y B) Temporada de lluvias. Las líneas blancas indican la dirección de las corrientes geostroficadas principales.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca en el proyecto *Objetando la Hipótesis del Refugio Profundo y sus implicaciones ante el cambio climático* (CONACYT-CF2019-39210). A Brenda Hermosillo Núñez y Omar Valencia Méndez por sus valiosos comentarios para mejorar el escrito, así como a los revisores anónimos.

REFERENCIAS

- BECKER, R. A., J. M. CHAMBERS & A. R. WILKS. 1988. *The new S language*. Wadsworth & Brooks/Cole. 702 pp. DOI: 10.1201/9781351074988
- BEHRENFELD, M. J. & P. G. FALKOWSKI. 1997. A consumer's guide to phytoplankton primary productivity models. *Limnology and Oceanography* 42(7): 1479-1491.
- BEST, D. J. & D. E. ROBERTS. 1975. Algorithm AS 89: The upper tail probabilities of Spearman's ρ . *Applied Statistics* 24: 377-379. DOI: 10.2307/2347111
- BORG, I. & P. J. F. GROENEN. 2005. *Modern multidimensional scaling: Theory and applications*. 2nd ed. Springer Series in Statistics, Springer New York. 614 p.
- CANDELA, A., K. EDELSON, M. M. GIERACH, D. R. THOMPSON, G. WOODWARD & D. WETTERGREEN. 2021. Using remote sensing and *in situ* measurements for efficient mapping and optimal sampling of coral reefs. *Frontiers in Marine Science* 8(689489): 1-17. DOI: 10.3389/fmars.2021.689489
- CARRIQUIRY, J. D. & H. REYES-BONILLA. 1997. Estructura de la comunidad y distribución geográfica de los arrecifes coralinos de Nayarit, Pacífico de México. *Ciencias Marinas* 23(2): 227-248.
- CERDEIRA-ESTRADA, S. & G. LÓPEZ-SALDAÑA. 2011. A novel satellite-based ocean monitoring system for Mexico. *Ciencias Marinas* 37(2): 237-247. DOI: 10.7773/cm.v37i2.1921
- CERVANTES-DUARTE, R., G. GAXIOLA-CASTRO & J. E. VALDEZ-HOLGUÍN. 1993. Relationship between surface chlorophyll and chlorophyll in the euphotic zone of the Gulf of California: possible application to estimate primary production with data obtained by remote sensors. *Ciencias Marinas* 19(4): 473-490. DOI: <https://doi.org/10.7773/cm.v19i4.943>
- CHAMBERS, J. M., A. E. FREENY & R. M. HEIBERGER. 1992. Analysis of variance; designed experiments. In: Chambers, J. M. & T. J. Hastie (Eds.). *Statistical models in S*. Wadsworth & Brooks/Cole, pp. 49.
- CONAGUA (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA). 2022. *Niveles hidrométricos de estaciones hidrométricas. Banco nacional de datos de aguas superficiales: Comisión Nacional del Agua*. México.
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., & J. Böhner, J. 2015. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4, Geoscientific Model Development 8, 1991-2007, DOI:10.5194/gmd-8-1991-2015
- CORTÉS-LARA, M. C., R. CORTÉS-ALTAMIRANO & A. P. SIERRA-BELTRÁN. 2004. Presencia de *Cochlodinium catenatum* (Gymnodiniales: Gymnodiniaceae) en mareas rojas de Bahía de Banderas, Pacífico mexicano. *Revista de Biología Tropical* 52 (suplemento 1): 35-49.
- CUPUL-MAGAÑA, F. G. 1998. ¿Quién es la Bahía de Banderas? *Divulgare* 21: 48-52.
- DOF (DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN). 2013. *ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas superficiales en las cuencas hidrológicas Ixtapa, Pitillal, Cuale, San Blas, Huicicila y Tecomala, mismas que forman parte de la Región Hidrológica*

- número 13 Río Huicicila. México, julio 12. También disponible en la página web: <https://www.dof.gob.mx/>
- DOF (DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN). 2018. *ACUERDO por el que se dan a conocer los resultados del estudio técnico de las aguas nacionales superficiales en las cuencas hidrológicas Salado, Cocula, Ahuacatlán, Atenguillo, Ameca Pijinto, Ameca Ixtapa A, Talpa, Mascota y Ameca Ixtapa B, de la Región Hidrológica número 14 Río Ameca*. México, febrero 12. También disponible en la página web: <https://www.dof.gob.mx/>
- FIEDLER, P. C. 1992. Seasonal climatologies and variability of eastern tropical Pacific surface waters. *NOAA Technical Reports* 109: 1-65.
- GLYNN, P. W. 1996. Coral reef bleaching: facts, hypotheses and implications. *Global Change Biology* 2: 495-509. DOI: 10.1111/j.1365-2486.1996.tb00063.x
- GOHIN, F. 2011. Annual cycles of chlorophyll-a, non-algal suspended particulate matter, and turbidity observed from space and in-situ in coastal waters. *Ocean Science* 7: 705-732. DOI: 10.5194/os-7-705-2011
- GOHIN, F., J. N. DRUON & L. LAMPERT. 2002. A five channel chlorophyll concentration algorithm applied to SeaWiFS data processed by SeaDAS in coastal waters. *International Journal of Remote Sensing* 23(8): 1639-1661.
- GÓMEZ-VILLARREAL, M. C., M. D. MARTÍNEZ-GAXIOLA & J. L. PEÑA-MANJARREZ. 2008. Proliferaciones algales 2000-2001 en Bahía de Banderas, México según el sensor SeaWiFS. *Revista de Biología Tropical* 56(4): 1653-1664.
- GONZÁLEZ-LUNA, C., A. FILONOV, O. MIRELES & I. TERESHCHENKO. 2019. Análisis espectral y dispersión superficial de detritos suspendidos en la Bahía de Banderas mediante imágenes de satélite. *Revista Cartográfica* 98: 223-237. DOI:10.35424/rcarto.i98.148
- HAMIDI, S. A., H. HOSSEINY, N. EKHTARI & B. KHAZAEI. 2017. Using MODIS remote sensing data for mapping the spatio-temporal variability of water quality and river turbid plume. *Journal of Coastal Conservation* 21: 939-950. DOI: 10.1007/s11852-017-0564-y
- HARRELL, F. E. JR. 2022. Hmisc: Harrell miscellaneous. R package version 4.7-1.
- HJMANS, R. 2022. Raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 1.6-17.
- HINDERSTEIN, L. M., J. C. A. MARR, F. A. MARTINEZ, M. J. DOWGIALLO, K. A. PUGLISE, R. L. PYLE, D. G. ZAWADA & R. APPELDOORN. 2010. Theme section on "Mesophotic coral ecosystems: Characterization, ecology, and management". *Coral Reefs* 29(2): 247-251. DOI: 10.1007/s00338-010-0614-5
- Hu, C., Z. Lee & B. Franz. 2012. Chlorophyll a algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference. *Journal of Geophysical Research* 117: C01011. DOI: 10.1029/2011jc007395
- IIEG (INSTITUTO DE INFORMACIÓN ESTADÍSTICA Y GEOGRÁFICA DE JALISCO). 2021. *Área Metropolitana Interestatal de Puerto Vallarta-Bahía de Banderas*. Gobierno del Estado de Jalisco, México. 37 p.
- KIRK, J. T. O. 2011. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Third edition. Cambridge University Press, United Kingdom. 649 p.
- LALLI, C. M. & T. R. PARSONS. 1997. The abiotic environment. In: Lalli, C. M. & T. R. Parsons (Eds.). *Biological Oceanography: An Introduction*. 2nd ed. Butterworth-Heinemann, pp. 16-38. DOI: 10.1016/B978-075063384-0/50058-X
- LAVÍN, M. F., E. BEIER, J. GÓMEZ-VALDÉS, V. M. GODÍNEZ & J. GARCÍA. 2006. On the summer poleward coastal current off SW México. *Geophysical Research Letters* 33: L02601. DOI: 10.1029/2005GL024686
- LEE, Z. P. 2005. A model for the diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance. *Journal of Geophysical Research* 110: C02016. DOI: 10.1029/2004jc002275
- LEE, Z. P., A. WEIDEMANN, J. KINDLE, R. ARNONE, K. L. CARDER & C. DAVIS. 2007. Euphotic zone depth: Its derivation and implication to ocean-color remote sensing. *Journal of Geophysical Research* 112: C03009. DOI: 10.1029/2006JC003802
- LONIN, S. 1997. Cálculo de la transparencia del agua en la Bahía de Cartagena. *Boletín Científico CIOH* 18:85-92.
- MCQUITTY, L. L. 1966. Similarity analysis by reciprocal pairs for discrete and continuous data. *Educational and Psychological Measurement* 26: 825-831. DOI: 10.1177/001316446602600402
- OUELLETTE, W. & W. GETINET. 2016. Remote sensing for marine spatial planning and integrated coastal areas management: Achievements, challenges, opportunities and future prospects. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 4: 138-157. DOI: 10.1016/j.rsase.2016.07.003
- PARKINSON, C. L. 2003. Aqua: An earth-observing satellite mission to examine water and other climate variables. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41 (2): 173-183. DOI: 10.1109/TGRS.2002.808319
- R CORE TEAM. 2022. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Available online at: <https://www.R-project.org/>
- REVELLE, W. 2022. Psych: Procedures for psychological, psychometric, and personality research. Northwestern University, Evanston, Illinois. R package version 2.2.9.
- RODRÍGUEZ-ESCOBAR, F. E. & L. E. CALDERÓN-AGUILERA. 2021. Mesophotic reefs of the Mexican Pacific: a ray of hope for benthic macroinvertebrates? *Reef Encounter* 36(1): 45-49.
- ROUSSELUW, P. J. 1987. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Computational and Applied Mathematics* 20: 53-65. DOI: 10.1016/0377-0427(87)90125-7
- RYDING, S. O. & W. RAST. 1989. *Control of eutrophication of lakes and reservoirs*. United Kingdom, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Programme on Man and the Biosphere (MAB), v. I, Parthenon Press, 314 p.
- SINA (SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN DEL AGUA). 2022. Características de las regiones hidrológicas. Servicio WS de la Comisión Nacional del Agua. También disponible en la página web: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/>

- WEI, T. & V. SIMKO. 2021. R package 'corrplot': Visualization of a correlation matrix. (Version 0.92).
- WRIGHT, J. & A. COLLING. 1995. Light and sound in seawater. *In*: Wright, J. & A. Colling (eds.). *Seawater: its composition, properties and behaviour*. 2nd ed. Pergamon, pp. 61-84. DOI: 10.1016/B978-0-08-042518-4.50010-4
- WU, M., W. ZHANG & X. WANG. 2009. Application of MODIS satellite data in monitoring water quality parameters of Chaohu Lake in China. *Environmental Monitoring and Assessment* 148: 255-264. DOI: 10.1007/s10661-008-0156-2
- XI, H., S. N. LOSA, A. MANGIN, P. GARNESON, M. BRETAGNON, J. DEMARIA, M. A. SOPPA, O. HEMBISE FANTON D ANDON & A. BRACHER. 2021. Global chlorophyll a concentrations of phytoplankton functional types with detailed uncertainty assessment using multi-sensor ocean color and sea surface temperature satellite products. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 126: e2020JC017127. DOI: 10.1029/2020JC017127
- ZAMUDIO, L., H. E. HURLBURT, E. J. METZGER & O. M. SMEDSTAD. 2002. On the evolution of coastal trapped waves generated by hurricane Juliette along the Mexican West Coast. *Geophysical Research Letters* 29 (23): 2141. DOI: 10.1029/2002GL014769