



Seasonal and interannual variability in chlorophyll concentration and primary productivity off Campeche, Gulf of Mexico

Variabilidad estacional e interanual de la concentración de clorofila y de la productividad primaria frente al estado de Campeche, golfo de México

[Santiago J Quetz-Que](#)¹, [Saúl Álvarez-Borrego](#)², [José Rubén Lara-Lara](#)^{1*}, [Ma. Elena Solana-Arellano](#)¹, [Alejandro Parés-Sierra](#)¹

¹ División de Oceanología, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, Zona Playitas, 22860 Ensenada, Baja California, Mexico.

² Investigador independiente.

* Corresponding author. E-mail: rlara@cicese.mx

ABSTRACT. The objective of this work was to characterize the spatiotemporal variability in satellite-derived chlorophyll concentration (Chl_{sat}), primary productivity (PP), sea surface temperature (SST), and sea surface height (SSH) in the Campeche Bank from July 2002 to December 2018. Monthly composites of Chl_{sat} and SST (MODIS-Aqua sensor) and SSH (COPERNICUS) were downloaded. PP compositions were downloaded from the Oregon State University web page. Four transects running perpendicular (T1 to T4) and 1 parallel (T5) to the coast of Campeche were studied. Time series and Hovmöller diagrams were constructed to study the spatial and temporal variations. The Chl_{sat} in T1 to T4 showed a clear separation between an inner zone (0–60 km) and an outer zone (60–200 km). The inner neritic zone showed maximum Chl_{sat} ($>2.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) and PP ($>2 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) values in the rainy season and minimum values in the dry season ($<2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ and $<2 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, respectively) because freshwater input in the inner zone provides nutrients for phytoplankton growth. The outer neritic zone showed the highest Chl_{sat} ($>0.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) and PP ($>0.7 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) values during cold fronts and the lowest during the dry season ($<0.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ and $<0.4 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) because cold fronts mix the water column and thus carry nutrients into the euphotic zone. SST showed maximum values ($>30 \text{ }^\circ\text{C}$) during the rainy season and minimum values ($<22 \text{ }^\circ\text{C}$) during cold fronts; maximum SSH ($>0.40 \text{ m}$) occurred during cold fronts, and minimum SSH ($<0.25 \text{ m}$) occurred during the dry season.

Key words: chlorophyll concentration, sea surface temperature, sea surface height, area off Campeche, Gulf of Mexico.

RESUMEN. El objetivo de este trabajo fue caracterizar la variabilidad espaciotemporal de clorofila satelital (Cl_{sat}), productividad primaria (PP), temperatura de la superficie del mar (TSM) y altura del nivel del mar (ANM) de julio de 2002 a diciembre de 2018 en el banco de Campeche. Se descargaron composiciones mensuales de Cl_{sat} y TSM del sensor MODIS-Aqua, y de ANM de la página COPERNICUS. Las composiciones de PP se descargaron de la página de internet de la Universidad Estatal de Oregón. Se estudiaron 4 transectos de 200 km perpendiculares a la costa de Campeche (T1 a T4), y 1 de 300 km paralelo a la misma (T5). Se construyeron series de tiempo y diagramas Hovmöller para estudiar las variaciones espaciales y temporales. La Cl_{sat} en T1 a T4 mostró una distinción entre una zona interior (0–60 km) y una exterior (60–200 km). La zona nerítica interior presentó los máximos de Cl_{sat} ($>2.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) y PP ($>2 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) en época de lluvias y los mínimos en época de secas ($<2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ y $<2 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, respectivamente), ya que los aportes de nutrientes por escorrentía a la zona interior proveen nutrientes para el fitoplancton. La zona nerítica exterior presentó los máximos de Cl_{sat} ($>0.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) y PP ($>0.7 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) durante los frentes fríos y los mínimos en secas ($<0.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ y $<0.4 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), debido a que los frentes fríos generan mezcla de la columna de agua y, consecuentemente, acarrear nutrientes hacia la zona eufótica. TSM presentó máximos ($>30 \text{ }^\circ\text{C}$) en época de lluvias y mínimos ($<22 \text{ }^\circ\text{C}$) durante frentes fríos; la ANM tuvo máximos ($>0.40 \text{ m}$) durante frentes fríos y mínimos ($<0.25 \text{ m}$) en época de secas.

Palabras clave: concentración de clorofila, temperatura superficial del mar, altura del nivel del mar, zona frente a Campeche, golfo de México.

Erratum

In the originally published version of this article, the affiliations were incorrect. This has since been corrected, and this version may be considered the authoritative version of record.

En la versión publicada originalmente de este artículo, las adscripciones eran incorrectas. Esto se corrigió y esta versión puede considerarse la versión autorizada.



©Santiago J Quetz-Que, Saúl Álvarez-Borrego, José Rubén Lara-Lara, Ma. Elena Solana-Arellano, Alejandro Parés-Sierra.

This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](#), which allows you to share and adapt the work, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license, and indicate if changes were made. Figures, tables, and other elements in the article are included in the article's CC BY 4.0 license, unless otherwise indicated. You must seek permission from the copyright holder for use of material not covered by this license. The journal title is protected by copyrights owned by Universidad Autónoma de Baja California, and the journal title and logo are not subject to this license.

INTRODUCTION

The Campeche Bank region located off the state of Campeche is economically and ecologically important due to its high richness in natural resources (Manzano-Sarabia and Salinas-Zavala 2008). Martínez-López and Parés-Sierra (1998) described an east–west current off the coast of northern Yucatán, which branches off to the south, off Campeche. The currents derived from the bifurcation carry upwelled waters from the Yucatan Current; however, the limit of the effects is the area off the northern portion of the peninsula (Merino 1997). Zavala-Hidalgo et al. (2003, 2006, and 2014) and Morey et al. (2005) described a similar circulation pattern, with southwesterly currents in the Campeche Bank during most of the year and a convergence zone southeast of the bank (between the states of Campeche and Tabasco); this generates a seasonal supply of nutrients and, therefore, chlorophyll in the northwest, which is enhanced by the presence of a semipermanent cyclonic eddy. Meteorological events (e.g., cold fronts, tropical storms, precipitation, hurricanes), depending on their periodicity and intensity, also have an effect on the region because of the changes they cause in environmental characteristics (Walker et al. 2005, Shropshire et al. 2016). Phytoplankton biomass (chlorophyll *a* [Chl_a]) and primary productivity (PP) show maximum values from September to December and minimum values from February to June (Manzano-Sarabia and Salinas-Zavala 2008, Salmerón-García et al. 2011).

The use of remote sensing data (e.g., satellite-derived chlorophyll [Chl_{sat}]) is a common technique to describe phytoplankton variability at large temporal and spatial scales because of the advantages it provides (Kirk 1994, Gaxiola-Castro et al. 2010). Even with this technique, few studies have been done on variations in Chl_{sat} and PP at large scales in the study region, so the objective of this work was to characterize the spatiotemporal variability in phytoplankton Chl_a and PP off the state of Campeche and relate it to the physical processes that control these variables at large spatial and temporal scales. The analyses were performed with sea surface temperature (SST), sea surface height (SSH), Chl_{sat}, and PP data that were obtained from monthly composites generated by satellite sensors from July 2002 to December 2018. The SST and SSH are indicative variables of physical processes that affect phytoplankton; for example, low SST and SSH values can indicate divergent flows that carry water vertically to the surface, such as upwelling or cyclonic eddies, causing fertilization of the euphotic zone (Mann and Lazier 2013). Conversely, high SST and SSH values indicate convergent flows with relatively poor euphotic zones, such as the center of anticyclonic eddies.

MATERIALS AND METHODS

The study area is located in the southeast Gulf of Mexico and covers the portion of the Campeche Bank off the area

INTRODUCCIÓN

La región del banco de Campeche localizada frente al estado de Campeche es económica y ecológicamente importante debido a su alta riqueza de recursos naturales (Manzano-Sarabia y Salinas-Zavala 2008). Martínez-López y Parés-Sierra (1998) describieron una corriente con dirección este-oeste frente a las costas del norte de Yucatán, la cual se bifurca hacia al sur, frente a Campeche. Estas corrientes derivadas de la bifurcación transportan agua de surgencia proveniente de la corriente de Yucatán; sin embargo, las afectaciones se limitan a la parte frente al norte de la península (Merino 1997). Zavala-Hidalgo et al. (2003, 2006 y 2014) y Morey et al. (2005) describieron un patrón de circulación similar, con corrientes hacia el suroeste en el banco de Campeche durante casi todo el año y una zona de convergencia en el sureste del banco (entre los estados de Campeche y Tabasco), lo cual genera un transporte estacional de nutrientes y, por lo tanto, de clorofila hacia el noroeste, el cual es potenciado por la presencia de un giro ciclónico semipermanente. Los eventos meteorológicos (e.g., frentes fríos, tormentas tropicales, precipitaciones, huracanes), según su periodicidad e intensidad, también tienen efecto en la región debido a los cambios que causan en las características ambientales (Walker et al. 2005, Shropshire et al. 2016). La biomasa (clorofila *a* [Chl_a]) y la producción primaria (PP) del fitoplancton muestran valores máximos de septiembre a diciembre y mínimos de febrero a junio (Manzano-Sarabia y Salinas-Zavala 2008, Salmerón-García et al. 2011).

El uso de datos obtenidos mediante sensores remotos (e.g., clorofila satelital [Chl_{sat}]) es una técnica común para describir la variabilidad del fitoplancton a grandes escalas temporales y espaciales debido a las ventajas que brinda (Kirk 1994, Gaxiola-Castro et al. 2010). Aun con esta técnica, son pocos los estudios realizados sobre las variaciones de Chl_{sat} y PP a escalas grandes en la región de estudio, por lo que el objetivo de este trabajo fue caracterizar la variabilidad espaciotemporal de la Chl_a y la productividad primaria fitoplanctónicas frente al estado de Campeche y relacionarla con los procesos físicos que controlan estas variables a escalas espaciales y temporales grandes. Los análisis se llevaron a cabo con datos de temperatura superficial del mar (TSM), altura del nivel del mar (ANM), Chl_{sat} y PP obtenidos a partir de composiciones mensuales generadas por sensores satelitales de julio de 2002 a diciembre de 2018. La TSM y la ANM son variables indicativas de procesos físicos que afectan al fitoplancton; por ejemplo, las TSM y las ANM bajas pueden indicar flujos divergentes que acarrear agua verticalmente hacia la superficie, como en una surgencia o en un giro ciclónico, lo que causa la fertilización de la zona eufótica (Mann y Lazier 2013). En el caso contrario, las TSM y las ANM altas indican flujos convergentes con relativa pobreza de la zona eufótica, como en el caso del centro de un giro anticiclónico.

between the Calkiní and Palizada municipalities (Fig. 1). This area is characterized by a continental shelf ~250 km wide, with a gentle slope that reaches maximum depths of ~200 m in the outer part. The area has a warm subhumid to a warm humid climate, and the annual average environmental temperature varies between 26 and 27 °C, with maximum values of >30 °C and a minimum of 18 °C. Total precipitation varies between 1,200 and 2,000 mm per year in the southern and central parts and is ~800 mm per year in the northern region (Mendoza-Vega and Ku-Quej 2010). Three seasons are described for this zone: dry (March–May), rainy (June–October), and cold fronts or “nortes” (November–February). Tropical storms and hurricanes are common in July–October, and the intensification of winds and marine currents in this season interrupts the supply of sediment from underground freshwater blooms, rivers, and mangroves located along the coast (Morales-Ojeda 2010). The region is characterized as a karstic zone because of its composition of mostly calcium carbonate rocks that form water tables, underground rivers, and underwater outcrops along the coast (Álvarez-Góngora and Herrera-Silveira 2006, Valle-Levinson 2011).

We used spatiotemporal data series from monthly composites of SST, SSH, Chl_{sat} , and PP from July 2002 to December 2018. The composites of SST and Chl_{sat} were downloaded from the “Ocean Color” website (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>, accessed in 2019) of the National Aeronautics and Space Administration (NASA),

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se localiza en el sureste del golfo de México y abarca la porción del banco de Campeche frente al área entre el municipio de Calkiní y el de Palizada (Fig. 1). Esta zona se caracteriza por presentar una plataforma continental de ~250 km de ancho, con una pendiente suave que alcanza profundidades máximas de ~200 m en la parte exterior. El clima es de cálido subhúmedo a cálido húmedo y la temperatura ambiental media anual varía entre 26 y 27 °C, con valores máximos de >30 °C y mínimos de 18 °C. La precipitación total varía entre 1,200 y 2,000 mm anuales en las partes sur y centro, y es ~800 mm anuales en la región norte (Mendoza-Vega y Ku-Quej 2010). Para esta zona, se describen 3 estaciones del año: secas (marzo-mayo), lluvias (junio-octubre) y frentes fríos o “nortes” (noviembre-febrero). Las tormentas tropicales y los huracanes son comunes en julio-octubre, y la intensificación en los vientos y las corrientes marinas en esta temporada genera suspensión de los sedimentos aportados por los florecimientos subterráneos de agua dulce, los ríos y los manglares localizados a lo largo de la costa (Morales-Ojeda 2010). La región se caracteriza por ser una zona kárstica debido a la composición de las rocas, en su mayoría de carbonato de calcio, lo que permite la formación de mantos freáticos, ríos subterráneos y afloramientos submarinos a lo largo de la costa (Álvarez-Góngora y Herrera-Silveira 2006, Valle-Levinson 2011).

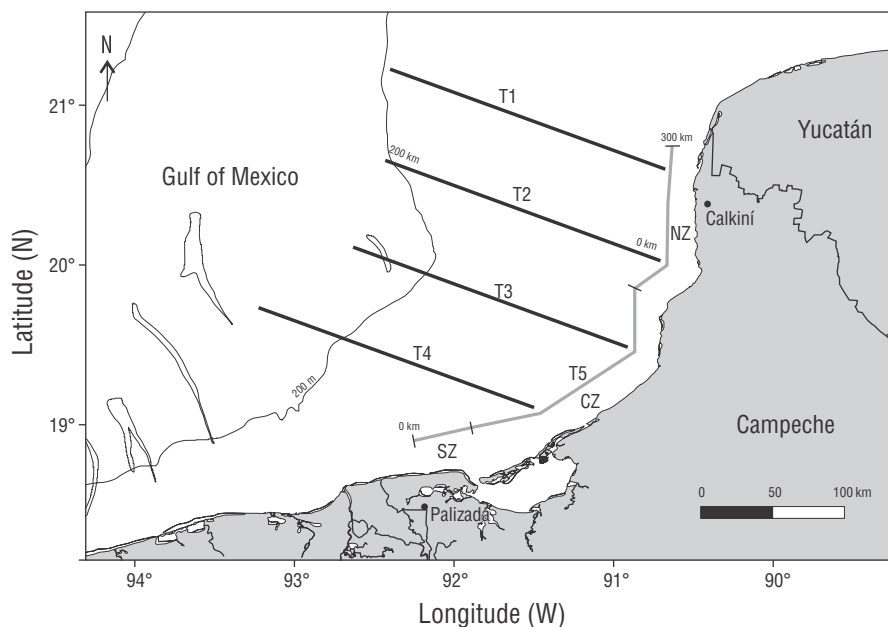


Figure 1. Study area and location of the transects (T) in the Bank of Campeche, off the state of Campeche. NZ: northern zone; CZ, central zone; SZ, southern zone.

Figura 1. Área de estudio y ubicación de los transectos (T) en el banco de Campeche, frente al estado de Campeche. NZ: zona norte; CZ, zona centro; SZ, zona sur.

with a spatial resolution of $9 \times 9 \text{ km}^2$ and a processing level of 3. The SST data were 11- μm wavelength diurnal radiance measurements. We downloaded PP data from the “Ocean Productivity” website (<https://www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity/>, accessed in 2019) of Oregon State University; the spatial resolution was $18 \times 18 \text{ km}^2$. SSH data were obtained from the “MULTIOBS_GLO_PHY_REP_015_002” product that is available on the “COPERNICUS” website (<http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/>, accessed in 2019) of the European Union; the resolution was $27 \times 27 \text{ km}^2$. We processed the images with the SeaWiFS Data Analysis System program (SeaDAS 7.5.3) that was downloaded from the same NASA website.

To describe the spatiotemporal variation in SST, SSH, Chl_{sat} , and PP, we sampled four 200-km transects perpendicular to the coast (T1 to T4) and one 300-km transect parallel to the coast (T5) (Fig. 1). Hovmöller diagrams were constructed for each variable and each transect. Furthermore, due to the difference in Chl_{sat} and PP values, the transects that were perpendicular to the coast were divided into an inner neritic zone (0–60 km) and an outer neritic zone (60–200 km). The transect parallel to the coast was divided into 3 zones: north (NZ, 200–300 km), center (CZ, 40–200 km), and south (SZ, 0–40 km). We obtained time series (2002–2018) data from the average SST, SSH, Chl_{sat} , and PP values corresponding to each month in each of the zones and in each transect. The distributions of SST, SSH, Chl_{sat} , and PP did not show normality or homoscedasticity. Therefore, for the statistical analysis, Bayesian analyses of variance (ANOVAs) were performed (*a priori* and *a posteriori*) to explore differences between areas and seasons in R Studio (v.1.1.463, 2009–2018). The Bayes factors (BFs) were interpreted according Jeffreys (1967).

RESULTS

With respect to the complete transects, the SST showed a seasonal behavior with maximum values ($>30 \text{ }^\circ\text{C}$) in the rainy season (June to October) and minimum values ($<22.5 \text{ }^\circ\text{C}$) in the cold front season (November to February) (Fig. 2a). The time series showed, in many cases, the mean SST values for each zone had double maxima in the same year (Fig. 3a, b). The interannual differences in the time series of the T1 to T4 transects were $\sim 1 \text{ }^\circ\text{C}$ for both neritic zones, whereas the general intra-annual interval for the entire series was up to $\sim 8 \text{ }^\circ\text{C}$ (from 22.5 to 30.5 $^\circ\text{C}$) (Fig. 3a, b). The SSH had a similar spatial behavior from 0 to 200 km in the entire time series, with maximum ($0.400\text{--}0.500 \pm 0.006 \text{ m}$) (the number after the \pm is the standard error) and minimum ($<0.200 \text{ m}$) periodic values, which indicated a marked seasonality that was different from that of the SST. The maximum SSH values occurred in shorter periods than those of the SST during the last part of the rainy season and the cold front season; the minimum SSH values occurred during the dry season and

Se utilizaron series espaciotemporales generadas a partir de composiciones mensuales de TSM, ANM, Cl_{sat} y PP de julio de 2002 a diciembre de 2018. Las composiciones de TSM y Cl_{sat} se descargaron de la página de internet “Ocean Color” (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>, accesado in 2019) de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA, por sus siglas en inglés); la resolución espacial fue de $9 \times 9 \text{ km}^2$, con un nivel de procesamiento 3. Los datos de TSM son mediciones diurnas de radiancia de 11 μm de longitud de onda. Los datos de PP se descargaron desde la página de internet “Ocean Productivity” (<https://www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity/>, accesado en 2019) de la Universidad Estatal de Oregon; la resolución espacial fue de $18 \times 18 \text{ km}^2$. Los datos de ANM se obtuvieron del producto “MULTIOBS_GLO_PHY_REP_015_002”, disponible en la página de internet de “COPERNICUS” (<http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/>, accesado in 2019) de la Unión Europea; la resolución fue de $27 \times 27 \text{ km}^2$. Las imágenes se procesaron con el programa SeaWiFS Data Analysis System (SeaDAS 7.5.3), descargado desde la misma página de internet de la NASA.

Para describir la variación espaciotemporal de TSM, ANM, Cl_{sat} y PP, se muestrearon 4 transectos de 200 km perpendiculares a la costa (T1 a T4) y uno de 300 km paralelo a la misma (T5) (Fig. 1). Se construyeron diagramas Hovmöller para cada variable y para cada transecto. Además, debido a la diferencia en los valores de Cl_{sat} y PP, los transectos perpendiculares a la costa se dividieron en zona nerítica interior (0–60 km) y zona nerítica exterior (60–200 km). El transecto paralelo a la costa se dividió en 3 zonas: norte (ZN, 200–300 km), centro (ZC, 40–200 km) y sur (ZS, 0–40 km). Las series de tiempo (2002–2018) se generaron a partir del promedio de los valores de TSM, ANM, Cl_{sat} y PP correspondientes a cada mes en cada una de las zonas y en cada transecto. Las distribuciones de TSM, ANM, Cl_{sat} y PP no presentaron normalidad ni homoscedasticidad. Por lo tanto, para el análisis estadístico, se realizaron análisis de varianza (ANDEVA) bayesianos (*a priori* y *a posteriori*) para explorar diferencias entre zonas y entre estaciones del año con ayuda de R-studio (v.1.1.463, 2009–2018). Los factores de Bayes (FB) se interpretaron de acuerdo con lo propuesto por Jeffreys (1967).

RESULTADOS

Tomando los transectos completos, la TSM presentó un comportamiento estacional con valores máximos ($>30 \text{ }^\circ\text{C}$) en la época de lluvias (junio a octubre) y mínimos ($<22.5 \text{ }^\circ\text{C}$) en la época de frentes fríos (noviembre a febrero) (Fig. 2a). En las series de tiempo se aprecia que, en muchos casos, los valores medios de TSM para cada zona presentaron máximos dobles en el mismo año (Fig. 3a, b). Las diferencias interanuales en las series de tiempo de los transectos T1 a T4 fueron $\sim 1 \text{ }^\circ\text{C}$ para ambas zonas neríticas, mientras que el intervalo intra-anual general para todas las series fue de

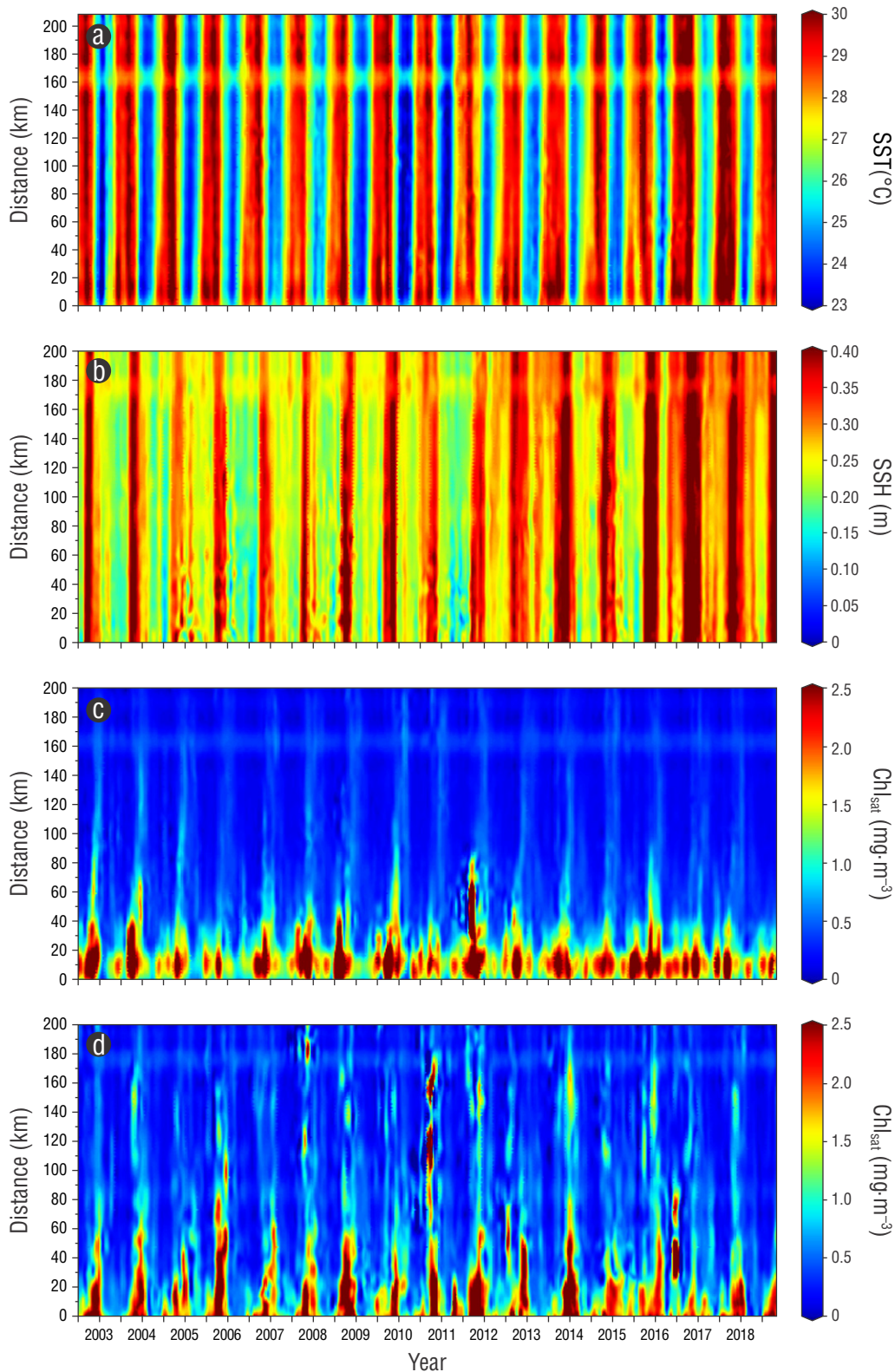


Figure 2. Hovmöller diagrams for sea surface temperature (SST) (a) and sea surface height (SSH) (b) in the T4 transect, and of satellite-derived chlorophyll (Chl_{sat}) concentration in the T1 (c) and T4 (d) transects. The numbers 02, 03, etc., on the horizontal axes represent the years 2002, 2003, etc. The tick above each number indicates the start of each year.

Figura 2. Diagramas Hovmöller de la temperatura superficial del mar (SST) (a) y la altura del nivel del mar (SSH) (b) en el transecto T4, y de la concentración de clorofila derivada de satélite (Chl_{sat}) en los transectos T1 (c) y T4 (d). Los números 02, 03, etc., en el eje horizontal, representan los años 2002, 2003, etc. La marca arriba de cada número indica el inicio de cada año.

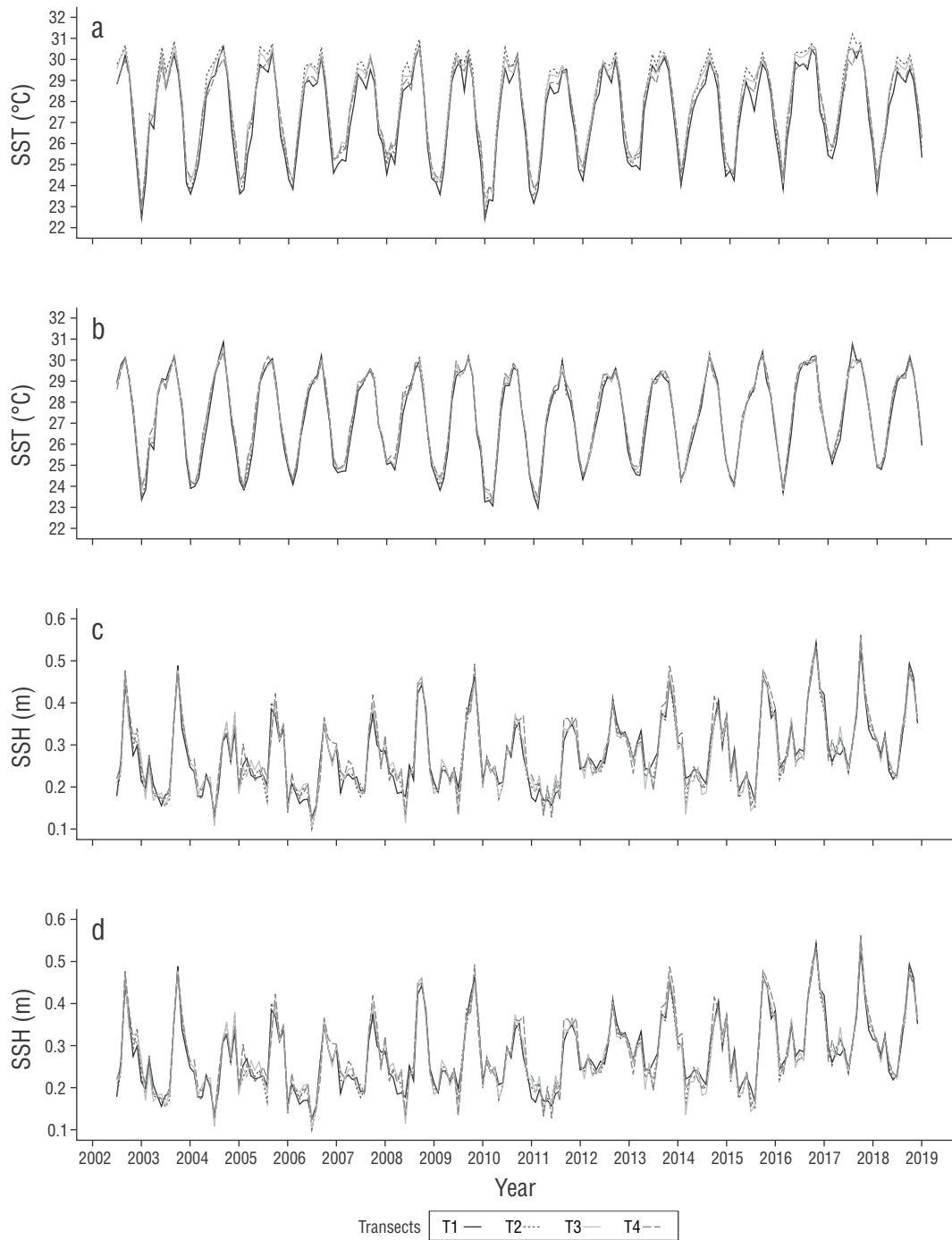


Figure 3. Mean time series for sea surface temperature (SST) and sea surface height (SSH) in the T1–T4 transects (a and c are for the inner neritic zone, and b and d for the outer neritic zone).

Figura 3. Series de tiempo de las medias de la temperatura superficial del mar (SST) y la altura del nivel del mar (SSH) para los transectos T1-T4 (a y c son para la zona nerítica interior, y b y d son para la zona nerítica exterior).

lasted longer than the low SST values (Figs. 2a–b, 3a–d). The overall intra-annual variation range of SSH for the T1 to T4 series was ~ 0.4 m (Fig. 3c–d). The SSH time series showed more variations than those for the SST, with multiple maxima and minima in the same year (Fig. 3). The maximum and minimum values of SSH increased since 2016 (~ 0.05 m) (Figs. 2b, 3c–d).

At T5, the SST means for the NZ, CZ, and SZ were similar, with a value of 27.9 ± 0.15 °C (Fig. 4a). In general, all the SST series (T1 to T5) had the highest values (>30 °C) in 2016 and 2017 and the lowest values (<22.5 °C) in 2003, 2010, and 2011 (Figs. 3a–b, 4a). The SSH means for the NZ, CZ, and SZ of T5 were similar (0.270 ± 0.006 m). In T5, the maximum annual values (>0.50 m) occurred in 2016 and 2017, and the minimum values (<0.150 m) occurred in 2004 and 2006 (Fig. 4b).

The spatial differences for Chl_{sat} and PP were very noticeable in the T1 to T3 transects, with maximum annual values $>5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ and $>3 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, respectively, in the first 60 km and $<1.4 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ and $<1.4 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, respectively, in areas 60 to 200 km from the coast (Figs. 2c, 5). The PP had a variation that was similar to that of Chl_{sat} . The Hovmöller diagrams showed similar Chl_{sat} and PP behaviors for T1, T2, and T3 (not illustrated for T2 and T3) but clearly different behavior for T4 (Fig. 2c, d). In the inner neritic zone, the mean values of Chl_{sat} and PP in T2 were often higher than those in the other transects, but in the outer neritic zone, the highest mean values occurred in T4 (Fig. 5). In T4, very high values were often observed at very great distances from the coast (in 2007–2008, these high values reached the limit of the study area) (Fig. 2d). The highest Chl_{sat} values in the inner neritic zone occurred during the rainy season (between ~ 4 and $\sim 8 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$), and in the outer zone from T1 to T3, the highest Chl_{sat} values occurred during the cold front season (between ~ 0.6 and $\sim 1.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$). The minimum values of Chl_{sat} occurred during the dry season in the inner zone ($<0.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) and during the rainy season in the outer zone ($<0.2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$). In general, an interannual variation in Chl_{sat} and PP was observed throughout the transects but was more distinct in the inner neritic zone (Figs. 4c, 5a–b).

In the case of T5, parallel to the coast, 3 zones were identified according to their Chl_{sat} and PP differences: the north zone (200–300 km), which was clearly distinguished by its annual maximum values of up to $\sim 9 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ and $>6 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, respectively, which were higher than those of the other 2 zones; and the central and south zones, which had similar Chl_{sat} and PP values but lower annual Chl_{sat} minima in the central zone (60–200 km) than in the south zone (0–60 km), with values of up to $<1.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Fig. 4c–d). In T5, there was a clear interannual variation, with annual maxima that varied from $<4 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ to $8\text{--}9 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Fig. 4c); the interannual variation in PP was not as clear as that in Chl_{sat} . In some cases, 2 or more maxima of Chl_{sat} and PP occurred in the same year (Fig. 4c–d).

hasta ~ 8 °C (de 22.5 a 30.5 °C) (Fig. 3a, b). La ANM tuvo un comportamiento espacial similar desde 0 hasta 200 km en todas las series de tiempo, con valores máximos ($0.400\text{--}0.500 \pm 0.006$ m) (de aquí en adelante el número después del \pm es el error estándar) y mínimos (<0.200 m) periódicos, lo cual indica una estacionalidad marcada, pero diferente al de la TSM. Los valores máximos de ANM se presentaron en periodos más breves que los de la TSM, durante la última parte de la estación de lluvias y la estación de frentes fríos; los valores mínimos de ANM se presentaron durante la época de secas y tuvieron mayor duración que los valores bajos de TSM (Figs. 2a–b, 3a–d). El intervalo de variación intra-anual general de ANM para las series T1 a T4 fue de ~ 0.4 m (Fig. 3c–d). Las series de tiempo de ANM presentaron más variaciones que las de TSM, con máximos y mínimos múltiples en el mismo año (Fig. 3). Los valores máximos y mínimos de ANM aumentaron a partir de 2016 (~ 0.05 m) (Figs. 2b, 3c–d).

En T5 las medias de TSM para ZN, ZC y ZS fueron similares, con un valor de 27.9 ± 0.15 °C (Fig. 4a). En general, todas las series de TSM (T1 a T5) presentaron los valores más altos (>30 °C) en 2016 y 2017 y los valores más bajos (<22.5 °C) en 2003, 2010 y 2011 (Figs. 3a–b, 4a). Las medias de ANM para ZN, ZC y ZS de T5 fueron similares (0.270 ± 0.006 m). En T5, los valores anuales máximos (>0.50 m) se presentaron en 2016 y 2017 y los mínimos (<0.150 m) en 2004 y 2006 (Fig. 4b).

Las diferencias espaciales para Cl_{sat} y PP fueron muy notorias en los transectos T1 a T3, con valores máximos anuales $>5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ y $>3 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, respectivamente, en los primeros 60 km, y $<1.4 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ y $<1.4 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, respectivamente, en el intervalo de 60 a 200 km de la costa (Figs. 2c, 5). La PP tuvo una variación similar a la de Cl_{sat} . Los diagramas Hovmöller mostraron comportamientos de Cl_{sat} y PP similares para T1, T2 y T3 (no ilustrado para T2 y T3), pero un comportamiento claramente diferente para T4 (Fig. 2c, d). En la zona nerítica interior, a menudo, los valores medios de Cl_{sat} y PP en T2 fueron mayores que en los otros transectos, pero en la zona nerítica exterior, los valores medios mayores ocurrieron en T4 (Fig. 5). En T4 se observaron a menudo valores muy altos a distancias muy grandes de la costa (en 2007–2008 estos valores altos llegaron hasta el límite del área de estudio) (Fig. 2d). Los valores de Cl_{sat} más altos en la zona nerítica interior se presentaron durante la época de lluvias (entre ~ 4 y $\sim 8 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$); y en la zona exterior de T1 a T3, los valores de Cl_{sat} más altos se presentaron durante la época de frentes fríos (entre ~ 0.6 y $\sim 1.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$). Los valores mínimos de Cl_{sat} se presentaron durante la época de secas para la zona interior ($<0.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) y durante la época de lluvias para la zona exterior ($<0.2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$). En general, se apreció una variación interanual de Cl_{sat} y PP a todo lo largo de los transectos, pero más claramente en la zona nerítica interior (Figs. 4c, 5a–b).

En el caso de T5, paralelo a la costa, se identificaron 3 zonas de acuerdo con las diferencias de Cl_{sat} y PP: la zona norte (200–300 km), claramente distinguida por sus valores máximos anuales de hasta $\sim 9 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ y $>6 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,

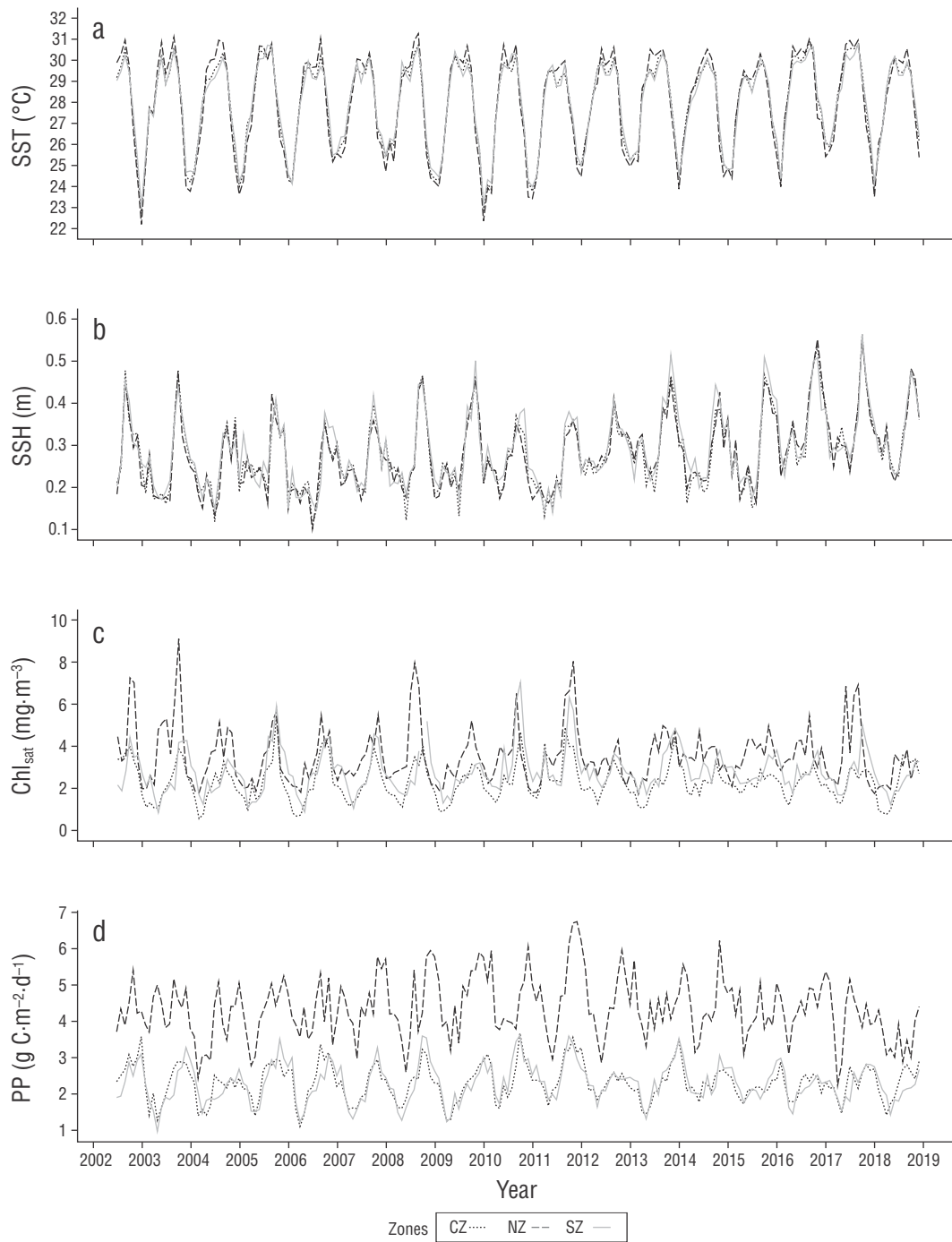


Figure 4. Mean time series for sea surface temperature (SST) (a), sea surface height (SSH) (b), satellite-derived chlorophyll (Chl_{sat}) concentration (c), and primary productivity (PP) (d) in T5. Northern zone, NZ; central zone, CZ; and southern zone, SZ.

Figura 4. Series de tiempo de las medias de la temperatura superficial del mar (SST) (a), la altura del nivel del mar (SSH) (b), la concentración de clorofila derivada de satélite (Chl_{sat}) (c) y la producción primaria (PP) (d) para T5. Zona norte, NZ; zona central, CZ; y zona sur, SZ.

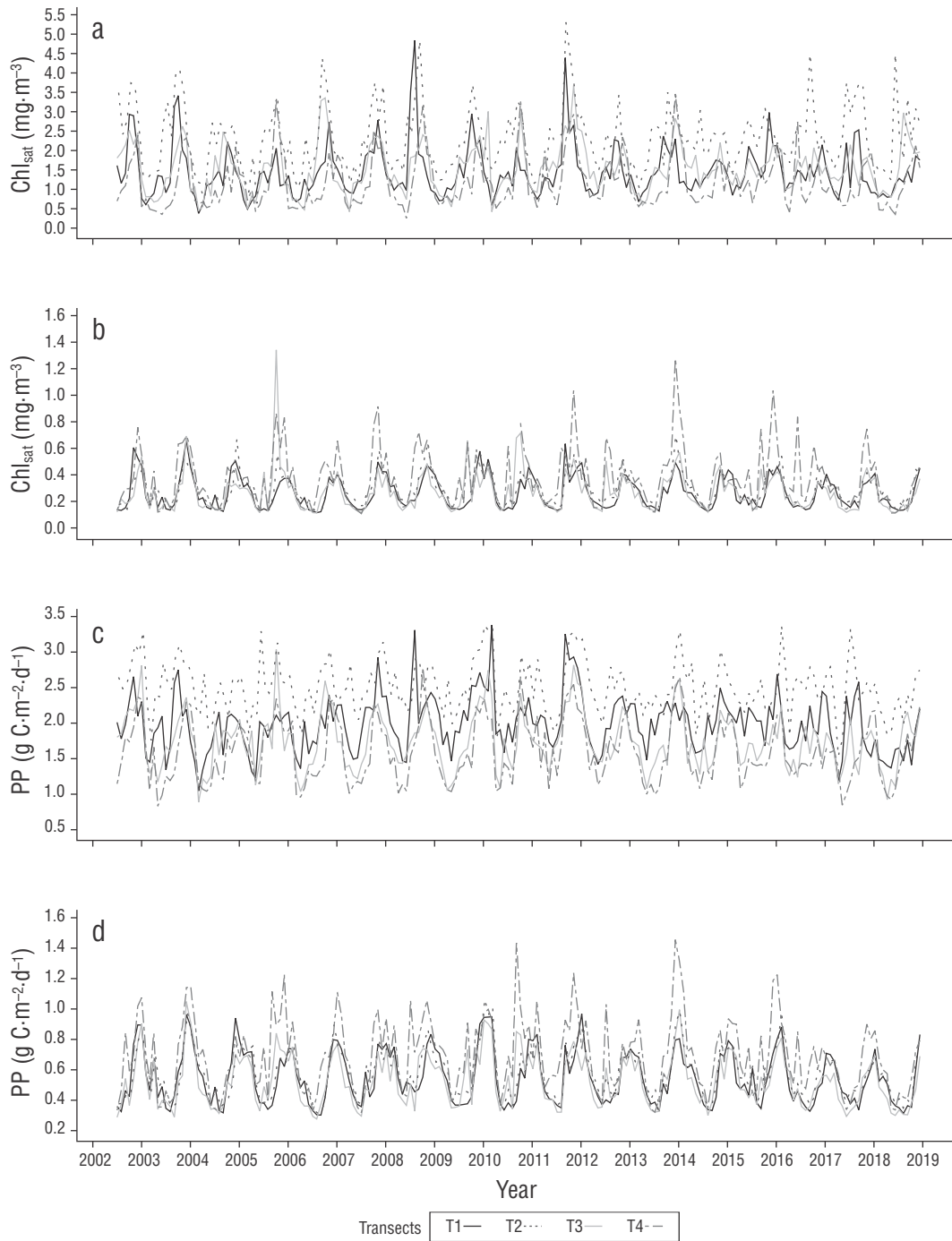


Figure 5. Mean time series for satellite-derived chlorophyll (Chl_{sat}) concentration and primary productivity (PP) in the T1–T4 transects (**a** and **c** are for the inner neritic zone, and **b** and **d** for the outer neritic zone).

Figura 5. Series de tiempo de las medias de la concentración de clorofila derivada de satélite (Chl_{sat}) y producción primaria (PP) para los transectos T1–T4 (**a** y **c** son para la zona nerítica interior, y **b** y **d** para la zona nerítica exterior).

A priori Bayesian ANOVAs for SST showed spatial differences with substantial evidence ($BF = 15$) between the inner and outer neritic zones and with null evidence ($BF < 3$) between the different T5 zones (Fig. 6a). *A priori* Bayesian ANOVAs of SST showed decisive differences ($BF > 100$) between seasons (cold fronts, rainy, and dry) for all transects (Fig. 6b). With respect to the SST, the ANOVAs showed no evidence for differences between the inner and outer neritic zones and differences with decisive evidence between seasons for all the transects (Fig. 6c–d).

In relation to the *a priori* Bayesian ANOVAs in the Chl_{sat} and PP mean series of the T1 to T4 transects (Fig. 5), differences were found between the inner and outer neritic zones and between seasons, both with decisive evidence ($BF > 100$) (Fig. 6e–h). *A priori* Bayesian ANOVAs in the Chl_{sat} and PP mean series of transect T5 found differences between the north, central, and south zones with decisive evidence (Fig. 6e, g).

DISCUSSION

Clear intra-annual, interannual, and spatial variations predominated in the study area for all the analyzed properties. During the dry season, the Chl_{sat} and PP values were minimal due to the high stratification of the water column and low levels of dissolved nutrients (Okolodkov 2003). The maximum values of Chl_{sat} and PP in the rainy season (June–October) were possibly caused by the fact that in the inner neritic zone, the large volume of water produced by precipitation, coupled with the karstic nature of the area, supplied nutrients to the coast through upwelling and runoff (Burnett et al. 2003, Troccoli-Ghinaglia et al. 2004, Mulligan and Charette 2009). The presence of multiple annual Chl_{sat} and PP maxima (Fig. 4c, d) was possibly due to temporal variations in the nutrient supply and variations in the intensity of zooplankton grazing, but there were no data to explore these possibilities.

Oceanographic dynamics, with offshore advection components, cause high Chl_{sat} and PP values to extend tens of kilometers offshore (up to 60 km) throughout the study area (Johannes 1980, Lohrenz et al. 1997, Slomp and Van-Capellen 2004). Okolodkov (2003) described the effect of upwelling that extended beyond the Campeche Bank, which could be a determining factor in the fertilization of the study area. However, the results presented here indicated a biological impact that generally reached only up to 60 km from the coast (Fig. 2c); in addition, the winds are conducive to coastal upwelling more or less year round, but the high values of Chl_{sat} and PP occurred only in the rainy season. The values in the T4 transect were an exception caused by the convergence of the current from the north that ran parallel to the coast of the Yucatan Peninsula and the current from the north that ran parallel to the coast of Tampico and Veracruz. This convergence generates a seaward flow beyond 200 km from the coast (Martínez-López

respectivamente, mayores que los de las otras 2 zonas; y las zonas centro y sur, que tuvieron valores de Cl_{sat} y PP similares, pero con los mínimos anuales de Cl_{sat} más pequeños en la zona centro (60–200 km), de hasta $<1.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, que en la zona sur (0–60 km) (Fig. 4c–d). En T5 se presentó una clara variación interanual, con máximos anuales que variaron de $<4 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ a $8\text{--}9 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Fig. 4c); la variación interanual de PP no fue tan clara como la de Cl_{sat} . En algunos casos se presentaron 2 o más máximos de Cl_{sat} y PP en el mismo año (Fig. 4c–d).

Los ANDEVA bayesianos *a priori* para TSM mostraron diferencias espaciales con evidencia sustancial ($FB = 15$) entre las zonas neríticas interior y exterior, y con evidencia nula ($FB < 3$) entre las diferentes zonas de T5 (Fig. 6a). Los ANDEVA bayesianos *a priori* de TSM mostraron diferencias decisivas ($FB > 100$) entre estaciones del año (frentes fríos, lluvias y secas) para todos los transectos (Fig. 6b). En cuanto a la ANM, los ANDEVA resultaron en diferencias con evidencia nula para las comparaciones entre zona nerítica interior y zona nerítica exterior y en diferencias con evidencia decisiva entre estaciones del año para todos los transectos (Fig. 6c–d).

Con relación a los ANDEVA bayesianos *a priori* de las series de las medias de Cl_{sat} y PP para los transectos T1 a T4 (Fig. 5), se encontraron diferencias entre las zonas neríticas interior y exterior, y diferencias entre estaciones del año, ambas con evidencia decisiva ($FB > 100$) (Fig. 6e–h). Los ANDEVA bayesianos *a priori* de las series de las medias de Cl_{sat} y PP para el transecto T5 resultaron en diferencias entre las zonas norte, centro y sur con evidencia decisiva (Fig. 6e, g).

DISCUSIÓN

En el área de estudio predominaron variaciones claras intra-anales, interanuales y espaciales de todas las propiedades analizadas. Durante la estación de secas, los valores de Cl_{sat} y PP fueron mínimos debido a la gran estratificación de la columna de agua y a los bajos niveles de nutrientes disueltos (Okolodkov 2003). Los valores máximos de Cl_{sat} y PP en la época de lluvias (junio–octubre) se debieron, posiblemente, a que en la zona nerítica interior, los grandes volúmenes de agua producto de las precipitaciones, aunado a la naturaleza kárstica de la zona, permitieron el suministro de nutrientes a la costa mediante los afloramientos subterráneos y las escurrientías (Burnett et al. 2003, Troccoli-Ghinaglia et al. 2004, Mulligan y Charette 2009). La presencia de máximos anuales múltiples de Cl_{sat} y PP (Fig. 4c, d) posiblemente se deba a variaciones temporales de este aporte de nutrientes y a variaciones en la intensidad del pastoreo del zooplancton, pero no se cuenta con datos para explorar estas posibilidades.

La dinámica oceanográfica, con componentes de advección hacia mar adentro, hace que las lengüetas de valores altos de Cl_{sat} y PP se extiendan por decenas de kilómetros hacia mar adentro (hasta 60 km) en toda el área de estudio (Johannes

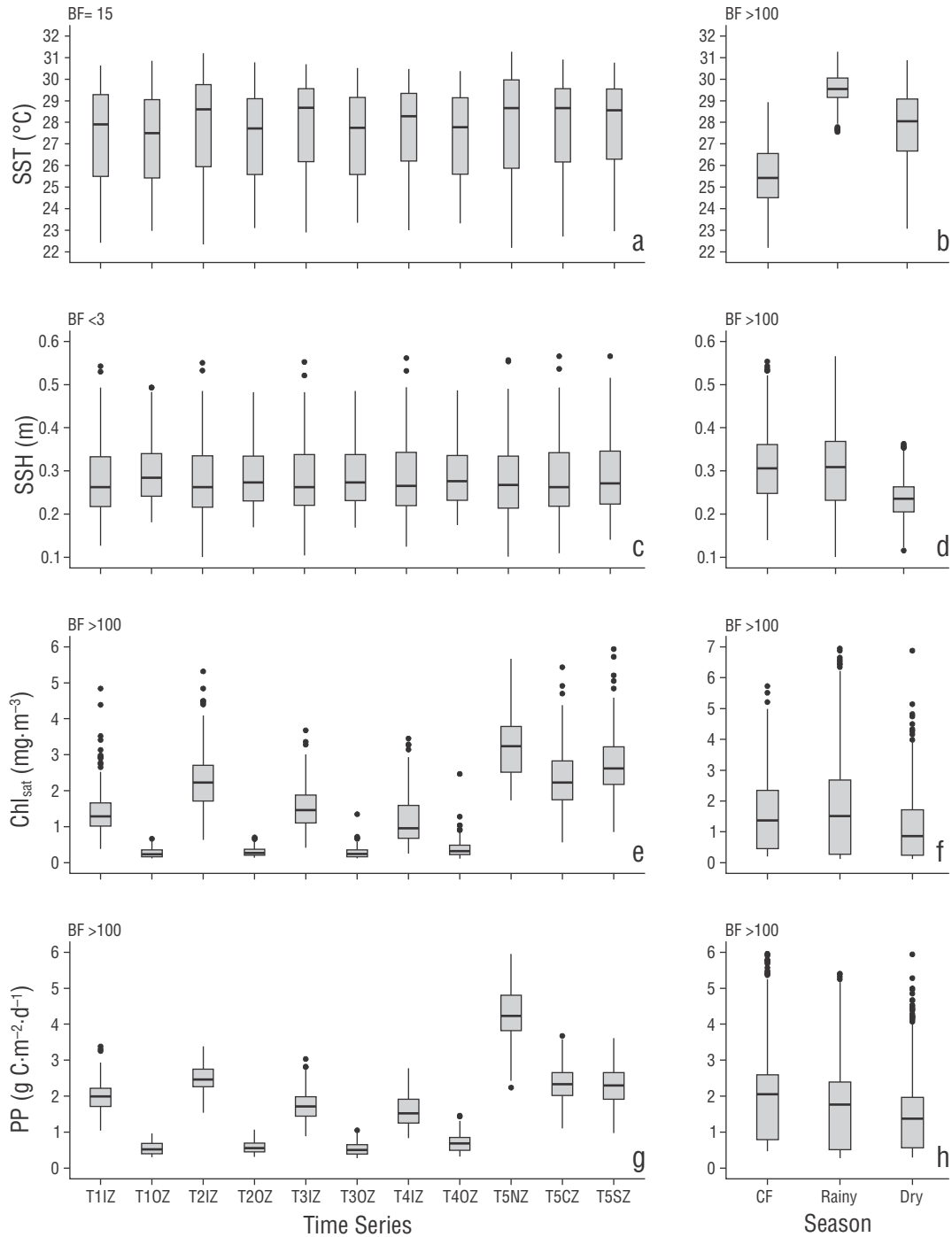


Figure 6. Box plots of the different sets of data as indicated on the horizontal axes. T1IZ is the inner zone of T1, T1OZ is the outer zone of T1, and so on. T5NZ, T5CZ, and T5SZ are the northern zone, the central zone, and the southern zone of T5, respectively. CF is the “cold fronts” season, “Rainy” is the rainy season, and “Dry” is the dry season. BF is the Bayes factor.

Figura 6. Diagramas de caja de los diferentes conjuntos de datos como se indica en los ejes horizontales. T1IZ es la zona interior de T1, T1OZ es la zona exterior de T1, y así sucesivamente. T5NZ, T5CZ y T5SZ son la zona norte, la central y la sur de T5, respectivamente. CF es la estación de los “frentes fríos”, “Rainy” es la estación lluviosa y “Dry” es la estación de secas. BF es el factor de Bayes.

and Parés-Sierra 1998, Martínez-López and Zavala-Hidalgo 2009) that carries high concentrations of Chl_{sat} to locations that are sometimes even farther than the study area (Fig. 2d).

Álvarez-Góngora and Herrera-Silveira (2006) found high concentrations of $\text{Chl}a$ (up to $>12 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, measured in water samples) off Celestún (in the northernmost part of our study area) during the rainy season and attributed them to the nutrients supplied by runoff. The values reported by Álvarez-Góngora and Herrera-Silveira (2006) were higher than the maximum values obtained in this study (Chl_{sat} up to $>8 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$). This difference could have resulted from our data being monthly averages of large areas (81 km^2), whereas Álvarez-Góngora and Herrera-Silveira (2006) used instantaneous and punctual sampling. Despite the large differences in methodologies, these numbers showed a high concordance, indicating that satellite data are not overestimating $\text{Chl}a$. Carranza-Edwards et al. (1993) reported a gradient in the concentration of suspended sediments (which also translates into dissolved nutrients) from the coast toward the sea caused by the currents of the Campeche Bank. These authors suggested that suspended sediments are closely related to biological communities, especially phytoplankton.

Nutrients that are carried to the sea by runoff are not able to reach the outer neritic zone ($>60 \text{ km}$), as they precipitate (e.g., iron) or are consumed by phytoplankton, but phytoplankton biomass can be carried much further offshore by rip currents, such as the one observed in T4 (Fig. 2c–d). The differences in Chl_{sat} and PP values between the inner and outer neritic zones and the time lag in which the maximum values occurred suggested that there were different fertilization processes in these 2 zones. As indicated above, in the outer neritic zone, maximum values of these properties occurred during the cold front season (November–February). With cold fronts, the water column tends to homogenize, which leads to lower surface temperatures and a greater availability of nutrients in the euphotic zone (Müller-Karger et al. 1991, Liceaga and Luna 1999). The fact that the values of Chl_{sat} and PP in the outer neritic zone were lower than those in the inner zone indicated that in the outer zone, cold front mixing fertilizes the euphotic zone to a much lesser degree than freshwater runoff in the inner zone. Another possible factor is the difference in zooplankton grazing in each region (Pal and Choudhury 2014), but there are no data to explore this effect. The Chl_{sat} results from water samples during the cold front season in the outer neritic zone ($0.5\text{--}0.9 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) were similar to those reported by Liceaga and Luna (1999) ($0.4\text{--}0.9 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$), which also indicated a high degree of agreement, despite the difference in the 2 methodologies.

Oceanographic conditions in the inner zone were favorable during the cold front season for high values of Chl_{sat} and PP, but these were not the maximum values. The highest values of Chl_{sat} and PP coincided with the maximum values

1980, Lohrenz et al. 1997, Slomp y Van-Capellen 2004). Okolodkov (2003) describió el efecto de surgencias que se extendía más allá del banco de Campeche, lo cual podría ser un factor determinante en la fertilización del área de estudio. Sin embargo, los resultados aquí presentados indican un impacto biológico que llega, generalmente, solo hasta 60 km de la costa (Fig. 2c); además, los vientos son propicios para surgencias costeras prácticamente todo el año, pero los valores altos de Cl_{sat} y PP solo se dieron en la época de lluvias. El transecto T4 fue una excepción, ya que hay una convergencia de la corriente proveniente del norte paralela a la costa de la península de Yucatán y la corriente proveniente del norte paralela a la costa de Tampico y Veracruz. Esta convergencia genera un flujo hacia mar adentro más allá de 200 km de la costa (Martínez-López y Parés-Sierra 1998, Martínez-López y Zavala-Hidalgo 2009) que acarrea concentraciones altas de Cl_{sat} , en ocasiones hasta más allá del área de estudio (Fig. 2d).

Álvarez-Góngora y Herrera-Silveira (2006) encontraron concentraciones altas de $\text{Cl}a$ (hasta $>12 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, medidas en muestras de agua) frente a Celestún (en la parte más norteña de nuestra área de estudio) durante la estación de lluvias y las atribuyeron al aporte de nutrientes por escorrentía. Los valores reportados por Álvarez-Góngora y Herrera-Silveira (2006) son mayores que los máximos obtenidos en este trabajo (Cl_{sat} hasta $>8 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$). La diferencia podría deberse a que los datos aquí presentados son promedios mensuales de áreas grandes (81 km^2), mientras que Álvarez-Góngora y Herrera-Silveira (2006) se basaron en muestreos instantáneos y puntuales. A pesar de las diferencias grandes en metodologías, estos números muestran una concordancia elevada, indicadora de que los datos de satélite no están haciendo una sobreestimación de la $\text{Cl}a$. Carranza-Edwards et al. (1993) reportaron la existencia de un gradiente en la concentración de sedimentos en suspensión (lo que también se traduce en nutrientes disueltos) de la costa hacia mar adentro causado por las corrientes del banco de Campeche. Estos autores sugirieron que los sedimentos en suspensión están muy relacionados con las comunidades biológicas, en especial con el fitoplancton.

Los nutrientes acarreados al mar por las escorrentías no son capaces de llegar hasta la zona nerítica exterior ($>60 \text{ km}$), ya que se precipitan (e.g., el hierro) o son consumidos por el fitoplancton, pero la biomasa fitoplanctónica puede ser acarreada mucho más mar adentro por corrientes de retorno como la producida en T4 (Fig. 2c–d). Las diferencias de Cl_{sat} y PP entre las zonas neríticas interior y exterior, y el desfase temporal en que se presentaron los valores máximos, sugieren que existen procesos diferentes de fertilización en estas 2 zonas. Como se indicó anteriormente, en la zona nerítica exterior, los máximos de estas propiedades se presentaron en la época de frentes fríos (noviembre-febrero). Con los frentes fríos, la columna de agua tiende a homogeneizarse, lo cual conlleva a temperaturas superficiales bajas y mayor disponibilidad de nutrientes en la zona eufótica (Müller-Karger et al. 1991, Liceaga y Luna 1999). El que los valores de Cl_{sat} y

of SSH, contrary to what was expected in an oceanic area without freshwater input. In the inner zone of our study area, freshwater input causes an increase in nutrients and an increase in SSH due to a lower water density in the upper part, as well as lower atmospheric pressure during storms.

The decisive evidence of the differences in Chl_{sat} and PP between the T5 zones could be related to the existence of different coastal ecosystems (Arreola-Lizárraga et al. 2018). The northern zone has mangroves, which export large amounts of dissolved nutrients offshore (Jennerjahn and Ittekkot 2002). The south area has the Grijalva-Usumacinta System and the Terminos Lagoon; however, fewer nutrients are exported to the sea from here than from the mangroves in the north (Hernández-Arana et al. 2003). The central zone lacks very productive coastal ecosystems, and the contribution of the Champotón River is much less than that of the Grijalva-Usumacinta System, so its effects are very localized (Rebolledo-Vieyra 2010).

The SSH tended to increase in the last years that were sampled (Figs. 2b, 3c–d, 4b), which coincided with the results reported by Tamisiea et al. (2014), who mentioned that the SSH annually increased in the Gulf of Mexico by ~ 6 mm in association with climate change. Seasonal variations and interannual changes in SST have been reported by Muller-Karger et al. (2015), although these authors did not include data from 2013 onward. The temporal variation patterns in Chl_{sat} did not coincide with those in SST, which suggested that in this study region, there are other physical and biological factors that affect the behavior of the phytoplankton biomass. Muller-Karger et al. (2015) reported that the maximum values of Chl_{sat} occurred when the lowest temperatures coincided with greater than average anomalous winds. The Chl_{sat} maxima that did not coincide with the lowest temperatures in the study area may have been due to the occurrence and intensity of cold fronts, hurricanes, and tropical storms in the region, which cause high rainfall.

The performed analyses confirmed the reported seasonality of Chl_{sat} for the region off Campeche (Martínez-López and Zavala-Hidalgo 2009). However, although in most regionalizations of the Gulf of Mexico, the study area is considered a single region, our results show that it is highly heterogeneous due to local and regional physical phenomena that occur there.

ACKNOWLEDGMENTS

The first author received a postgraduate scholarship from the National Council for Science and Technology (a.k.a. CONACYT in Mexico). We thank NASA (USA) and Oregon State University for providing the satellite images and software for data processing.

English translation by Claudia Michel-Villalobos

PP de la zona nerítica exterior fueran más bajos que los de la zona interior indica que en la zona exterior la mezcla por frentes fríos fertiliza la zona eufótica en mucho menor grado que las escorrentías de agua dulce en la interior. Otro posible factor es el pastoreo diferente del zooplankton en cada región (Pal y Choudhury 2014) pero no hay datos para explorar este efecto. Los resultados de Cl_{sat} para la estación de frentes fríos en la zona nerítica exterior ($0.5\text{--}0.9 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) fueron similares a los reportados por Liceaga y Luna (1999) ($0.4\text{--}0.9 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) a partir de muestras de agua, lo cual indica una gran concordancia, de nuevo, a pesar de la diferencia de las 2 metodologías.

No obstante que las condiciones oceanográficas en la zona interior fueron favorables durante la estación de frentes fríos para valores altos de Cl_{sat} y PP, estos no fueron máximos. Los valores más altos de Cl_{sat} y PP coincidieron con los máximos de ANM, contrario a lo esperado en una zona oceánica sin aporte de agua dulce. En la zona interior de nuestra área de estudio, el aporte de agua dulce causa un aumento de nutrientes y un incremento en ANM al haber agua menos densa en la parte superior, además de una menor presión atmosférica durante las tormentas.

Las diferencias con evidencias decisivas de Cl_{sat} y PP entre las zonas de T5 posiblemente se debieron a la existencia de distintos ecosistemas costeros (Arreola-Lizárraga et al. 2018). La zona norte contiene manglares, los cuales exportan mar adentro gran cantidad de nutrientes disueltos (Jennerjahn e Ittekkot 2002). En la zona sur se encuentra el sistema Grijalva-Usumacinta y la laguna de Términos; sin embargo, los nutrientes que exportan al mar son menores que los provenientes de los manglares del norte (Hernández-Arana et al. 2003). La zona centro carece de ecosistemas costeros muy productivos, y el aporte del río Champotón es mucho menor que el del sistema Grijalva-Usumacinta, por lo que sus efectos son muy locales (Rebolledo-Vieyra 2010).

La tendencia al incremento de ANM en los últimos años muestreados (Figs. 2b, 3c–d, 4b) coincidió con lo reportado por Tamisiea et al. (2014), quienes mencionaron que la ANM tiene un incremento anual en el golfo de México de ~ 6 mm asociado al cambio climático. Las variaciones estacionales y los cambios interanuales de la TSM han sido reportadas por Muller-Karger et al. (2015), aunque estos autores no incluyen datos de 2013 en adelante. Los patrones de variación temporal de Cl_{sat} no coincidieron con los de TSM, lo que sugiere que en la región de este estudio existen otros factores físicos y biológicos que afectan el comportamiento de la biomasa fitoplanctónica. Muller-Karger et al. (2015) reportaron que los valores máximos de Cl_{sat} se presentaron cuando coincidieron las temperaturas más bajas y los vientos anómalos mayores al promedio. Los máximos de Cl_{sat} que no coinciden con las temperaturas más bajas en el área de estudio pueden deberse a la ocurrencia e intensidad de los frentes fríos, los huracanes y las tormentas tropicales en la región, que provocan precipitaciones pluviales altas.

REFERENCES

- Álvarez-Góngora C, Herrera-Silveira JA. 2006. Variations of phytoplankton community structure related to water quality trends in a tropical karstic coastal zone. *Mar Pollut Bull.* 52(1):48–60.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2005.08.006>
- Arreola-Lizárraga JA, Padilla-Arredondo G, Ruiz-Ruiz TM, Cruz-García LM, Méndez-Rodríguez LC, Hernández-Almaraz P, Vargas-González HH. 2018. Estuaries and coastal lagoons of Mexico: Challenges for science, management, and conservation. In: Ortega-Rubio A (ed.), *Mexican Natural Resources Management and Biodiversity Conservation*. Switzerland: Springer International Publishing AG. p. 251–283.
- Burnett WC, Bokuniewicz H, Huettel M, Moore WS, Taniguchi M. 2003. Groundwater and pore water inputs to the coastal zone. *Biogeochemistry.* 66(1–2):3–33.
<https://doi.org/10.1023/B:BI0G.000006066.21240.53>
- Carranza-Edwards A, Rosales-Hoz L, Monreal-Gómez A. 1993. Suspended sediments in the southeastern Gulf of Mexico. *Mar Geol.* 112(1–4):257–269.
[https://doi.org/10.1016/0025-3227\(93\)90172-r](https://doi.org/10.1016/0025-3227(93)90172-r)
- Gaxiola-Castro G, Cepeda-Morales JCA, Nájera-Martínez S, Espinosa-Carreón TL, De la Cruz-Orozco ME, Sosa-Avalos R, Aguirre-Hernández E, Cantú-Ontiveros JP. 2010. Biomasa y producción de fitoplancton. In: Gaxiola-Castro G, Durazo R (eds.), *Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California, 1997-2007*. Diez años de investigaciones mexicanas de la Corriente de California. Mexico City: SEMARNAT. p. 59–85.
- Hernández-Arana HA, Rowden AA, Attrill MJ, Warwick RM, Gold-Bouchot G. 2003. Large-scale environmental influences on the benthic macroinfauna of the southern Gulf of Mexico. *Estuarine, Coastal Shelf Sci.* 58(4):825–841.
[https://doi.org/10.1016/s0272-7714\(03\)00188-4](https://doi.org/10.1016/s0272-7714(03)00188-4)
- Jeffreys SH. 1967. *Theory of probability*. 3rd ed. Oxford (United Kingdom): Clarendon Press. 459 p.
- Jennerjahn TC, Ittekkot V. 2002. Relevance of mangroves for the production and deposition of organic matter along tropical continental margins. *Naturwissenschaften.* 89(1):23–30.
<https://doi.org/10.1007/s00114-001-0283-x>
- Johannes RE. 1980. The ecological significance of the submarine discharge of groundwater. *Mar Ecol Prog Ser.* 3(4):365–373.
- Kirk JTO. 1994. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge (United Kingdom): Cambridge University Press. 491 p.
- Liceaga S, Luna R. 1999. Spatio-temporal variation of phytoplankton on the continental margin in the SW Gulf of Mexico. *Rev Soc Mex Hist Nat.* 49:83–100.
- Lohrenz SE, Fahnenstiel GL, Redalje DG, Lang GA, Chen X, Dagg MJ. 1997. Variations in primary production of northern Gulf of Mexico continental shelf waters linked to nutrient inputs from the Mississippi River. *Mar Ecol Prog Ser.* 155:45–54.
<https://doi.org/10.3354/meps155045>
- Mann KH, Lazier JRN. 2013. *Dynamics of marine ecosystems: biological-physical interactions in the oceans*. 3rd ed. Cambridge (United Kingdom): Cambridge University Press. 649 p.
<https://doi.org/10.1002/9781118687901>
- Manzano-Sarabia MM, Salinas-Zavala CA. 2008. Variabilidad estacional e interanual de la concentración de clorofila *a* y temperatura superficial del mar en la región occidental del Golfo de México: 1996-2007. *Interciencia.* 33(9):628–634.
- Martínez-López B, Parés Sierra A. 1998. Circulación del Golfo de México inducida por mareas, viento y la corriente de Yucatán = Circulation in the Gulf of Mexico induced by tides, wind and the Yucatan Current. *Cienc Mar.* 24(1):65–93.
<https://doi.org/10.7773/cm.v24i1.740>
- Los análisis realizados confirmaron la estacionalidad de Cl_{sat} reportada para la región frente a Campeche (Martínez-López y Zavala-Hidalgo 2009). Sin embargo, a pesar de que en la mayoría de las regionalizaciones del golfo de México el área de estudio se considera como una sola, los resultados muestran que es altamente heterogénea como producto de los fenómenos físicos locales y regionales que ahí se presentan.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor recibió una beca de posgrado del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT, México). Agradecemos a la NASA (EUA) y a la Universidad Estatal de Oregón el proveer las imágenes de satélite y los programas para el procesamiento de los datos.

- Martínez-López B, Zavala-Hidalgo J. 2009. Seasonal and interannual variability of cross-shelf transports of chlorophyll in the Gulf of Mexico. *J Marine Syst.* 77(1–2):1–20.
<https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.10.002>
- Mendoza-Vega J, Ku-Quej V. 2010. Medio físico: Clima. In: Villalobos-Zapata GJ, Mendoza Vega J (Coord.), *La Biodiversidad en Campeche: Estudio de Estado*. Mexico: CONABIO, Gobierno del Estado de Campeche, UAC, ECOSUR. p. 16–18.
- Merino M. 1997. Upwelling on the Yucatan Shelf: hydrographic evidence. *J Marine Syst.* 13(1–4):101–121.
[https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(96\)00123-6](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(96)00123-6)
- Morales-Ojeda SM, Herrera-Silveira JA, Montero J. 2010. Terrestrial and oceanic Influence on spatial hydrochemistry and trophic status in subtropical marine near-shore waters. *Water Res.* 44(20):5949–5964.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.07.046>
- Morey SL, Zavala-Hidalgo J, O'Brien JJ. 2005. The seasonal variability of continental shelf circulation in the northern and western Gulf of Mexico from a high-resolution numerical model. In: Sturges W, Lugo-Fernandez A (eds.), *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models*. Washington (DC): American Geophysical Union. 161:203–218.
<https://doi.org/10.1029/161GM16>
- Muller-Karger FE, Smith JP, Werner S, Chen R, Roffer M, Liu Y, Muhling B, Lindo-Atichati D, Lamkin J, Cerdeira-Estrada, et al. 2015. Natural variability of surface oceanographic conditions in the offshore Gulf of Mexico. *Prog Oceanogr.* 134:54–76.
<https://doi.org/10.1016/j.pocan.2014.12.007>
- Müller-Karger FE, Walsh JJ, Evans RH, Meyers MB. 1991. On the seasonal phytoplankton concentration and sea surface temperature cycles of the Gulf of Mexico as determined by satellites. *J Geophys Res-Oceans.* 96(C7):12645–12665.
<https://doi.org/10.1029/91JC00787>
- Mulligan AE, Charette MA. 2009. Groundwater flow to the coastal ocean. *Elements of Physical Oceanography: A Derivative of the Encyclopedia of Ocean Sciences*. Amsterdam: Elsevier. p. 465–474.
- Okolodkov YB. 2003. A review of Russian plankton research in the Gulf of Mexico and the Caribbean Sea in the 1960-1980s. *Hidrobiológica.* 13(3):207–221.
- Pal R, Choudhury AK. 2014. A Brief Introduction to Phytoplankton. In: Pal R, Choudhury AK (eds.), *An Introduction to Phytoplankton: Diversity and Ecology*. New Delhi (India): Springer. 167 p.

- Rebolledo-Vieyra M. 2010. Medio físico: Hidrología. In: Villalobos-Zapata GJ, Mendoza-Vega J (Coord.), La Biodiversidad en Campeche: Estudio de Estado. Mexico: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. p. 2–7.
- Salmerón-García O, Zavala-Hidalgo J, Mateos-Jasso A, Romero-Centeno R. 2011. Regionalization of the Gulf of Mexico from space-time chlorophyll-*a* concentration variability. *Ocean Dynam.* 61(4):439–448.
<https://doi.org/10.1007/s10236-010-0368-1>
- Shropshire T, Li Y, He R. 2016. Storm impact on sea surface temperature and chlorophyll *a* in the Gulf of Mexico and Sargasso Sea based on daily cloud-free satellite data reconstructions. *Geophys Res Lett.* 43(23):12199–12207.
<https://doi.org/10.1002/2016GL071178>
- Slomp CP, Van Cappellen P. 2004. Nutrient inputs to the coastal ocean through submarine groundwater discharge: controls and potential impact. *J Hydrol.* 295(1–4): 64–86.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.02.018>
- Tamisiea ME, Hughes CW, Williams SDP, Bingley RM. 2014. Sea level: measuring the bounding surfaces of the ocean. *Philos T Roy Soc A.* 372(2025):20130336.
<https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0336>
- Troccoli-Ghinaglia L, Herrera-Silveira JA, Comín FA. 2004. Structural variations of phytoplankton in the coastal areas of Yucatán, México. *Hydrobiologia.* 519(1–3):85–102.
<https://doi.org/10.1023/b:hydr.0000026487.78497.b6>
- Valle-Levinson A, Mariño-Tapia I, Enriquez C, Waterhouse AF. 2011. Tidal variability of salinity and velocity fields related to intense point-source submarine groundwater discharges into the coastal ocean. *Limnol Oceanogr.* 56(4):1213–1224.
<https://doi.org/10.4319/lo.2011.56.4.1213>
- Walker ND, Leben RR, Balasubramanian S. 2005. Hurricane-forced upwelling and chlorophyll *a* enhancement within cold-core cyclones in the Gulf of Mexico. *Geophys Res Lett.* 32(18).
<http://dx.doi.org/10.1029/2005GL023716>
- Zavala-Hidalgo J, Gallegos-García A, Martínez-López B, Morey SL, O'Brien JJ. 2006. Seasonal upwelling on the western and southern shelves of the Gulf of Mexico. *Ocean dynam.* 56(3–4):333–338.
<https://doi.org/10.1007/s10236-006-0072-3>
- Zavala-Hidalgo J, Morey SL, O'Brien JJ. 2003. Seasonal circulation on the western shelf of the Gulf of Mexico using a high-resolution numerical model. *J Geophys Res-Oceans.* 108(C12):3389. <http://dx.doi.org/10.1029/2003JC001879>
- Zavala-Hidalgo J, Romero-Centeno R, Mateos-Jasso A, Morey SL, Martínez-López B. 2014. The response of the Gulf of Mexico to wind and heat flux forcing: What has been learned in recent years? *Atmósfera.* 27(3):317–334.
[https://doi.org/10.1016/s0187-6236\(14\)71119-1](https://doi.org/10.1016/s0187-6236(14)71119-1)

*Received 01 June 2020,
 accepted 18 June 2021.*