

**EN INVIERNO EL FLUJO NETO AIRE-AGUA DE CO₂ NO ES
SIGNIFICATIVO EN EL GOLFO DE CALIFORNIA AL NORTE DE 30°N**
**THE WINTER AIR-WATER CO₂ NET FLUX IS NOT SIGNIFICANT IN THE
GULF OF CALIFORNIA TO THE NORTH OF 30°N**

Martín A. Montes-Hugo¹
Saúl Álvarez-Borrego¹
Alberto Zirino²

¹ División de Oceanología
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada
Apartado postal 2732
Ensenada, Baja California, México

² Instituto de Investigaciones Oceanológicas
Universidad Autónoma de Baja California
Apartado postal 453
Ensenada, CP 22800, Baja California, México

Recibido en febrero de 1998; aceptado en junio de 1998

RESUMEN

Se ha reportado que en el Golfo de California la energía de marea se disipa con gran velocidad de las grandes islas hacia el norte, prácticamente sin disipación en la parte central y sur del golfo. También se ha reportado que debido a esto, en lugares como el Canal de Ballenas, la mezcla intensa de la columna de agua produce mayor presión parcial del CO₂ (pCO₂) en el agua superficial del mar que en la atmósfera, aun en verano. Esto causa que el CO₂ fluya del mar a la atmósfera. Con el propósito de explorar el posible papel del norte del Golfo de California (NGC), al norte de 30°N, como fuente de carbono hacia la atmósfera, caracterizamos la distribución espacial del pH y pCO₂ superficial, bajo condiciones de "invierno". Nuestros resultados no apoyan la hipótesis de un flujo aire-agua de CO₂ significativamente diferente de cero en el NGC. La pCO₂ superficial promedio en invierno de 1996 fue 355 μ atm, con un error estándar (s n^{-0.5}) de 5 μ atm. Este promedio no fue significativamente diferente del atmosférico, al 95% de nivel de confianza. Por lo tanto, el NGC no actúa como sumidero o fuente de CO₂.

Palabras clave: norte del Golfo de California, pH, pCO₂ superficial, flujo agua-aire de CO₂.

ABSTRACT

It has been reported that in the Gulf of California tidal energy dissipates at great rates from the region of the midrift islands to the north, with practically no dissipation in the central and southern regions of the gulf. It has also been reported that due to this energy dissipation, in places like Canal de Ballenas, strong water column mixing produces greater CO₂ partial pressure (pCO₂) in the surface seawater than in the atmosphere, even during summer. This causes the sea to be a source of CO₂ to the atmosphere. We

characterized the spatial distribution of surface pH and $p\text{CO}_2$, under "winter" conditions, in order to explore the possibility of the role of the northern Gulf of California (NGC), north of 30°N , as a source of CO_2 to the atmosphere. Our results do not support the hypothesis of a significant air-water CO_2 flux in the NGC. Mean surface $p\text{CO}_2$ during winter 1996 was $355 \mu\text{atm}$, with a standard error ($s \cdot n^{-0.5}$) of $5 \mu\text{atm}$. This mean was not significantly different from the atmospheric value, at 95% confidence level. Thus, the NGC acts neither as a source nor a sink of CO_2 .

Key words: northern Gulf of California, pH, surface $p\text{CO}_2$, air-sea CO_2 flux.

INTRODUCCIÓN

Hidalgo-González *et al.* (1997) y Zirino *et al.* (1997) reportaron valores elevados de presión parcial de bióxido de carbono ($p\text{CO}_2$) en las aguas superficiales de la zona de las islas Ángel de la Guarda y Tiburón (grandes islas), en el Golfo de California (hasta $>500 \mu\text{atm}$). Ellos explicaron estos altos valores como un efecto de los procesos vigorosos de mezcla por fenómenos asociados con las amplias mareas. La diferencia entre la $p\text{CO}_2$ del agua y la del aire define áreas de entrada o emisión de CO_2 hacia o desde el océano (Wong y Chan, 1991). En lugares como el Canal de Ballenas, la $p\text{CO}_2$ es mayor en el agua superficial del mar que en la atmósfera, aun en verano, causando que el primero sea una fuente de CO_2 para la segunda (Hidalgo-González *et al.*, 1997).

Argote *et al.* (1995) reportaron que en el Golfo de California la energía de marea se disipa con gran velocidad de la zona de las grandes islas hacia el norte, prácticamente sin ninguna disipación en la parte central y sur del golfo. Los valores máximos se presentan al suroeste de Tiburón (hasta $>0.3 \text{ W m}^{-2}$), luego se tienen valores mínimos en la parte central del norte del golfo ($<0.05 \text{ W m}^{-2}$), y de nuevo aumentan hasta alcanzar $>0.3 \text{ W m}^{-2}$ en el alto golfo. Estos resultados, y los de Zirino *et al.* (1997) e Hidalgo-González *et al.* (1997), nos permitirían plantear la hipótesis de que en el alto Golfo de California la $p\text{CO}_2$ del agua superficial es más alta que la atmosférica. Sin embargo, en el alto golfo no existen aguas profundas con alto contenido de CO_2 para mezclarse con las aguas superficiales. La situación no es clara *a priori* porque en el alto

INTRODUCTION

Hidalgo-González *et al.* (1997) and Zirino *et al.* (1997) reported high carbon dioxide partial pressure ($p\text{CO}_2$) values for the surface waters of the region of the midrift islands, Tiburón and Ángel de la Guarda, of the Gulf of California ($>500 \mu\text{atm}$). They explained these high values as an effect of the vigorous mixing processes due to phenomena associated with large amplitude tides. The difference between the seawater $p\text{CO}_2$ and that of the atmosphere defines areas of input or output of CO_2 from or into the ocean (Wong and Chang, 1991). In places like Canal de Ballenas, $p\text{CO}_2$ is greater in the surface waters than in the air, even during summer, causing the sea to be a source of CO_2 to the atmosphere (Hidalgo-González *et al.*, 1997).

Argote *et al.* (1995) calculated the tidal energy dissipation rate of the M_2 component in the Gulf of California. Their results show that this energy dissipates at high rates from the midrift island region to the north, with practically no dissipation in the central and southern gulf. Maximum dissipation rates occur to the southwest of Tiburón Island ($>0.3 \text{ W m}^{-2}$) and minimum in the central part of the northern Gulf ($<0.05 \text{ W m}^{-2}$); values increase again to $>0.3 \text{ W m}^{-2}$ in the upper gulf. These results, and those of Hidalgo-González *et al.* (1997) and Zirino *et al.* (1997), would allow us to make the hypothesis that in the upper gulf, surface seawater $p\text{CO}_2$ is higher than that of the atmosphere. However, in the upper gulf there are no deep waters with high CO_2 content to mix with surface waters. The situation is not clear *a priori*, because in the

golfo la intensa mezcla por marea podría remover los sedimentos y ponerlos en suspensión, enriqueciendo la columna de agua con CO₂. De hecho, el alto golfo tiene una gran concentración de material en suspensión que a menudo tiene una fracción grande de materia orgánica (García-de Ballesteros y Larroque, 1976).

El objetivo del presente trabajo fue caracterizar la distribución espacial del pH y pCO₂ superficial en el norte del Golfo de California (NGC), al norte de 30°N, bajo condiciones de "invierno", y explorar el posible papel de esta región del golfo como fuente de carbono hacia la atmósfera.

ÁREA DE ESTUDIO

El NGC es somero, con aguas muy isotérmicas en invierno. Aunque contiene algunas cuencas, su profundidad media es alrededor de 200 m. En el alto golfo la temperatura superficial cambia de cerca de 10°C en invierno hasta más de 32°C en verano (Álvarez-Borrego *et al.*, 1975), mientras que en la parte sur del NGC cambia de 17°C a 30°C. Lavín *et al.* (1997) realizaron observaciones directas de la circulación del NGC, entre el norte de Ángel de la Guarda y 30°45'N, con boyas a la deriva ARGOS. Estos autores reportaron que consiste de un giro que se revierte estacionalmente. Este giro es ciclónico en verano y anticiclónico en invierno, con velocidades promedio de 0.3 m s⁻¹ y máximas de 0.5 m s⁻¹. Sin embargo, estos giros están inmersos en una circulación muy compleja, denotada en invierno por boyas que se movieron hacia afuera y hacia adentro del giro, con algunas boyas dirigiéndose hacia el norte en la parte norte del giro y otras derivando en sentido contrario al giro.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se realizó un crucero en el NGC a bordo del B/V *Francisco de Ulloa*, del 25 de marzo al 10 de abril de 1996. En total se muestrearon 160 localidades (fig. 1). Se muestreó agua para pH, temperatura y salinidad superficial ($z = 2.8$ m),

upper gulf the intense tidal mixing could remove the sediments and put them into suspension, increasing the CO₂ content of the water column. In fact, the upper gulf has great amounts of suspended material that often has a large fraction of organic matter (García-de Ballesteros and Larroque, 1976).

The objective of the present work was to characterize the spatial distribution of surface pH and pCO₂ in the northern Gulf of California (NGC), north of 30°N, under "winter" conditions, to explore the possible role of this region of the gulf as a source of CO₂ to the atmosphere.

STUDY AREA

The NGC is shallow, with very isothermic waters in winter. Even though it has some basins, its mean depth is about 200 m. In the upper gulf, surface temperature ranges from about 10°C in winter to more than 32°C in summer (Álvarez-Borrego *et al.*, 1975), whereas in the southern part of the NGC it ranges from about 17°C to 30°C. Lavín *et al.* (1997) deployed ARGOS drifters in the NGC, between the region north of Ángel de la Guarda and 30°45'N. They reported that surface circulation consisted of a seasonally reversing gyre. This gyre is cyclonic during summer and anticyclonic in winter, with average speeds of 0.3 m s⁻¹ and maxima of 0.5 m s⁻¹. However, these gyres are immersed in a very complex circulation, as shown in winter by some drifters moving out and into the gyre, with some moving northward in the northern part of the gyre and others moving in an opposite direction to the gyre.

MATERIALS AND METHODS

During 25 March and 10 April 1996, a cruise was conducted in the NGC on board the R/V *Francisco de Ulloa*. A total of 160 stations were sampled (fig. 1). Seawater was sampled for surface ($z = 2.8$ m) pH, temperature and salinity, by means of a pumping system from the ship's hull

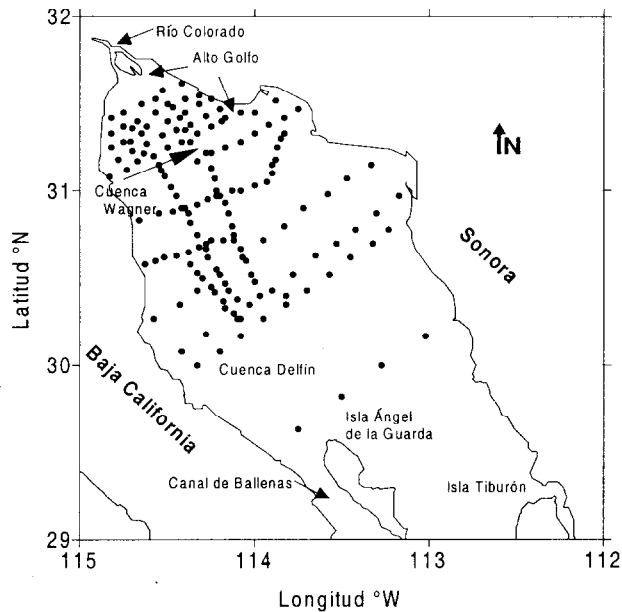


Figura 1. Área de estudio con las estaciones de muestreo.
Figure 1. Study area with sampling stations.

mediante un sistema de bombeo en el casco del barco. Las propiedades se midieron con un CTD (Ocean Seven 301, Multiparameter Probe). El sensor de salinidad se calibró con agua de Copenhague. El pH se midió con un electrodo de vidrio con celda de referencia de Ag/AgCl en un gel sólido de KCl (3M). La calibración del electrodo se hizo diariamente con una solución amortiguadora Tris (pH = 8.089, T°C = 25). Además, estas propiedades se midieron durante la navegación de una manera continua. La distancia recorrida por la muestra desde la toma en el casco del barco hasta el compartimento de flujo continuo del CTD (tiempo = 15 s) no influyó en forma significativa en la magnitud de las variables estudiadas ($P < 0.05$). El viento se registró continuamente a 10 m sobre el nivel del mar.

Los detalles del método para el cálculo de la $p\text{CO}_2$ y del flujo aire-agua de CO_2 se presentan en Hidalgo-González *et al.* (1997). Como lo hicieron estos autores, la alcalinidad específica se supuso constante e igual a $0.120 \text{ meq kg}^{-1}$ (‰ de

to the laboratory. These properties were measured with a CTD (Ocean Seven 301, Multiparameter Probe). The salinity sensor was calibrated with Copenhagen water. A glass electrode with a reference Ag/AgCl cell, in a KCl solid gel (3M), was used to measure pH. Electrode calibrations were performed daily, with a Tris buffer solution (pH = 8.089, T°C = 25). We also measured these variables underway. The distance covered by seawater from the hull to the laboratory (time = 15 s) did not significantly change the values of its properties ($P < 0.05$). Wind was recorded continually 10 m above sea level.

Details of the methods for pH analysis and the calculation of $p\text{CO}_2$ and the air-sea CO_2 fluxes are presented in Hidalgo-González *et al.* (1997). Specific alkalinity was assumed constant and equal to $0.120 \text{ meq kg}^{-1}$ (chlorinity unit) $^{-1}$. To calculate the air-water CO_2 flux, we used the atmospheric $p\text{CO}_2$ values measured at the Mauna Loa monitoring station, Hawaii (19°N), averaged for our study period (360 μatm) (NOAA, 1996).

clorinidad)¹. Para la pCO₂ atmosférica, se tomaron los valores promedio medidos en la estación de Mauna Loa, Hawaji (19°N), para las fechas de nuestro crucero (360 µatm) (NOAA, 1996).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El pH estandarizado a 25°C varió entre 7.96 y 8.10 (fig. 2a). El pH promedio (8.03) fue un poco menor que el pH de equilibrio con la atmósfera (8.09). Esto se debió al efecto de la mezcla por corrientes de marea que es más fuerte cerca de la isla Ángel de la Guarda y en el alto golfo, como lo describen Argote *et al.* (1995).

En el NGC, el pH se comportó como un trazador pasivo no conservador de la circulación superficial, con la dirección del flujo de valores de pH bajos hacia altos. Se presentó una mancha de valores de pH relativamente elevados, de cerca de 8.10, en la parte occidental del NGC, centrada en 30.3°N, 114.3°W. Posiblemente se debe al giro anticiclónico de invierno descrito por Lavín *et al.* (1997), con el cual coincide. Valores altos de pH implican aguas con elevado tiempo de residencia en la superficie, como las del centro de un giro anticiclónico en el hemisferio norte. Esta mancha estuvo rodeada de aguas con valores más bajos de pH; posiblemente éstas fueron acarreadas en el norte por el giro ciclónico del alto golfo hacia el sureste, y en el sur y este es agua de bajo pH transportada desde la zona de la cuenca Delfin. En esta cuenca se tiene la influencia de la alta turbulencia del Canal de Ballenas (fig. 2a).

Es notable la lengüeta larga de bajos valores de pH que se extiende desde la parte al norte del Canal de Ballenas hacia el norte y ligeramente hacia el este. El pH aumenta hacia el norte en esta lengüeta, de cerca de 7.96 hasta >8.00. En el centro del NGC, esta lengüeta posiblemente estuvo posicionada totalmente al este del giro anticiclónico, ya que indica una circulación superficial con dirección contraria a la del giro, que en esa parte es hacia el sur. El flujo superficial hacia el norte indicado por esta lengüeta está de acuerdo con algunas de las trayectorias de las boyas a la deriva

RESULTS AND DISCUSSION

The pH standardized at 25°C varied between 7.96 and 8.10 (fig. 2a). The average pH (8.03) was a little lower than the one for equilibrium with the atmosphere (8.09). This was due to the effect of tidal mixing that is stronger near Ángel de la Guarda Island and in the upper gulf, as indicated by Argote *et al.* (1995).

In the NGC, pH behaved as a passive, non-conservative tracer of surface circulation, with flux direction from low towards high pH values. There was a large patch of relatively high pH values (about 8.10) in the western part of the NGC, centered at 30.3°N, 114.3°W (fig. 2a). This patch coincides with and was possibly due to the anticyclonic gyre described by Lavín *et al.* (1997). High pH values imply waters with high residence time at the surface, as at the center of an anticyclonic gyre in the Northern Hemisphere. This patch was surrounded by waters with lower pH values; possibly, these were carried in the north from the cyclonic gyre of the upper gulf towards the southeast, and in the south and east it is low pH water transported from Delfin basin. This basin is influenced by the high turbulence of Canal de Ballenas (fig. 2a).

There is a long outstanding plume of relatively low pH values extending from the region north of Canal de Ballenas to the north and slightly to the east; pH increases northward in this plume, from about 7.96 to >8.00. At the center of the NGC, this plume may have been positioned totally to the east of the anticyclonic gyre, because it indicates a surface circulation with direction opposite to that of the gyre, which is southward in that area. The northward surface circulation suggested by the plume is in agreement with the trajectory of some of the drifters used by Lavín *et al.* (1997). North of 31°N, the plume joins the cyclonic gyre of the upper gulf, which also has relatively low pH values (fig. 2a).

Godínez-Sandoval (1997) proposed that water vertical convection in the upper gulf manifests as gravitational currents that circulate near the Baja

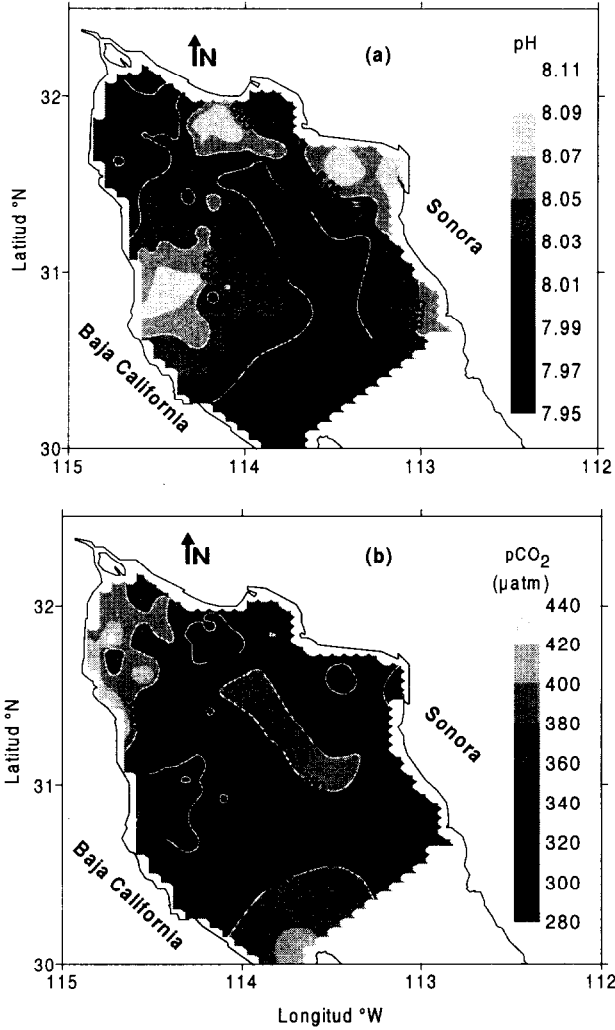


Figura 2. (a) Distribución espacial del pH superficial. (b) Distribución espacial de la pCO₂ superficial.
Figure 2. (a) Surface pH spatial distribution. (b) Surface pCO₂ spatial distribution.

usadas por Lavín *et al.* (1997). Al norte de 31°N esta lengua se une al giro ciclónico del alto golfo, que también tiene valores relativamente bajos de pH (fig. 2a).

California coast and, together with tidal residual currents and those generated by winds, form a cyclonic gyre. Our low pH values in the upper gulf are associated with turbidity and high

Godínez-Sandoval (1997) propuso que la convección vertical de agua en el alto golfo se manifiesta en la forma de corrientes gravitacionales que se desplazan cercanas a la costa de Baja California y que, sumadas a las corrientes residuales de marea y a las corrientes de viento, generan una circulación promedio ciclónica. Los bajos valores de pH en el alto golfo están asociados con la turbidez y altas tasas de respiración causadas por el gran contenido de materia orgánica en suspensión. La distribución del pH en el alto golfo, con los valores bajos desplazándose más hacia el sur del lado de Baja California que del de Sonora, está de acuerdo con la circulación propuesta por Godínez-Sandoval (1997) (fig. 2a).

La distribución espacial de la pCO₂ fue como imagen de espejo de la de pH (fig. 2a, b). El intervalo de variación de pCO₂ fue de 280 a 440 μ atm. Los valores más altos se encontraron justo al norte de Ángel de la Guarda y en el alto golfo. El 56% de las estaciones de muestreo presentaron una pCO₂ inferior a la atmosférica. La pCO₂ promedio de nuestra zona de estudio fue 355 μ atm, con un error estándar (s n^{-0.5}) de 5 μ atm. Esta media no es significativamente diferente del valor atmosférico al 95% de nivel de confianza. Por lo anterior, el flujo promedio aire-agua de CO₂ no fue significativamente diferente de cero ($P > 0.05$), a pesar de las elevadas velocidades de disipación de energía de marea.

En conclusión, nuestros datos no apoyan la hipótesis de un flujo aire-agua de CO₂ significativamente diferente de cero en el NGC. A pesar de contar con áreas específicas que temporalmente podrían estar aportando CO₂ a la atmósfera o tomándolo de ella, nuestros datos indican que el NGC como un todo no actúa como sumidero ni fuente de CO₂ hacia la atmósfera en invierno.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a M.F. Lavín del CICESE el haber permitido la participación de A.M. Montes-Hugo en su crucero del *Francisco de Ulloa* de marzo a abril de 1996.

respiration caused by the great content of particulate organic matter. The distribution of pH in the upper gulf, with lower values on the Baja California side than off Sonora, is in agreement with the water circulation proposed by Godínez-Sandoval (1997) (fig. 2a).

The surface pCO₂ spatial distribution was like a mirror image of that of pH (fig. 2a, b). The pCO₂ ranged from 280 to 440 μ atm. Highest pCO₂ values were found just north of Ángel de la Guarda Island and in the upper gulf. More than half of the sampling stations (56%) had a surface pCO₂ lower than the atmospheric value. The average pCO₂ for our study area was 355 μ atm, with a standard error (s n^{-0.5}) of 5 μ atm. This average is not significantly different from the atmospheric value, at the 95% confidence level. Therefore, the average air-water CO₂ flux was not significantly different from zero ($P < 0.05$), in spite of the high tidal energy dissipation rates.

In conclusion, our data do not support the hypothesis of an air-sea CO₂ flux significantly different from zero in the NGC. In spite of having some specific areas that may temporarily be giving or taking CO₂ from the atmosphere, our data indicate that the NGC as a whole acts neither as a source nor as a sink of CO₂ from the atmosphere during winter.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank M.F. Lavín of CICESE for allowing A.M. Montes-Hugo to participate on the *Francisco de Ulloa* cruise of March–April 1996.

English translation by the authors.

REFERENCIAS

- Álvarez-Borrego, S., Flores-Báez, B.P. y Galindo-Bect, L.A. (1975). Hidrología del alto Golfo de California. II. Condiciones durante invierno, primavera y verano. *Ciencias Marinas*, 2(1): 21–36.
- Argote, M.L., Amador, A., Lavín, M.F. and Hunter, J.R. (1995). Tidal dissipation and stratification in the

- Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, 100(C8): 16103–16118.
- García-de Ballesteros, G. y Larroque, M. (1976). Elementos sobre la distribución de turbidez en el alto Golfo de California. *CalCOFI Rep.*, XVIII: 81–108.
- Godínez-Sandoval, V.M. (1997). Condiciones anti-estuarinas en el alto Golfo de California. Tesis de Maestría, CICESE, Ensenada, México, 86 pp.
- Hidalgo-González, R.M., Álvarez-Borrego, S. y Zirino, A. (1997). Mezcla en la región de las grandes islas del Golfo de California: efecto en la $p\text{CO}_2$ superficial. *Ciencias Marinas*, 23(3): 317–327.
- Lavin, M.F., Durazo, R., Palacios, E., Argote, M.L. and Carrillo, L. (1997). Lagrangian observations of the circulation in the northern Gulf of California. *J. Phys. Oceanogr.*, 27(10): 2298–2305.
- NOAA (1996). Geophysical monitoring for climatic change. Mauna Loa 1996 atmospheric $p\text{CO}_2$ data. Washington, DC.
- Wong, C.S. and Chan, Y.-H. (1991). Temporal variations in the partial pressure and flux of CO_2 at ocean station P in the subarctic northeast Pacific Ocean. *Tellus*, 43B: 206–223.
- Zirino, A., Hernández-Ayón, J.M., Fuhrmann, R.A., Álvarez-Borrego, S., Gaxiola-Castro, G., Lara-Lara, J.R. y Bernstein, R.L. (1997). Estimaciones superficiales de $p\text{CO}_2$ en el Golfo de California a partir de mediciones continuas de pH e imágenes de satélite. *Ciencias Marinas*, 23(1): 1–22.