

Intercambio de CO₂ atmósfera-mar en algunas bahías del archipiélago Sabana-Camagüey

Atmosphere-sea exchange of CO₂ in some bays of Sabana-Camagüey Archipelago

José F. Montalvo*, Ileana de los Ángeles García*, Mariela Almeida** y Deysi López***.

* Instituto de Oceanología, CITMA, Avenida 1era # 18406. Reparto Flores, Playa, Habana, Cuba. Teléfono 2725420. e-mail: montalvo@oceano.inf.cu, ileana@oceano.inf.cu

** Centro de Servicios Ambientales de Matanzas. Autopista Sur Km.12, Los Taínos. Varadero, Matanzas, Cuba. e-mail: mariela.almeida@umcc.cu

*** GEOCUBA, Estudios Marinos, Regla, Habana, Cuba

Resumen

Se construyeron los pasados escenarios del gradiente de presión de CO₂ agua-aire y los flujos dióxido de carbono, en las aguas superficiales de las bahías Cárdenas, Santa Clara Oeste, Puerto de Sagua la Grande, San Juan de los Remedios, Buenavista, Perros, Jigüey y La Gloria entre 1991 y el 2005, por medio de un algoritmo que relaciona la temperatura superficial del mar TSM con el gradiente de presión aire-agua $\Delta p\text{CO}_2$. Entre los años 2010 y 2011, a partir de las mediciones de pH y alcalinidad total, se calculó la presión parcial del gas en el agua y los flujos en la bahía Jigüey. La mayoría de las bahías se comportaron como fuente de CO₂ a la atmósfera en la etapa climática de seca, y actuaron como sumidero del gas en la etapa de lluvias. La tasa de captación de carbón desde la atmósfera por la capa superficial del agua en las bahías fue superior a la de emisión hacia la atmósfera, excepto en la bahía La Gloria.

Abstract

Past scenarios, between 1991 and 2005, were constructed for the water-air CO₂ pressure gradient and carbon dioxide fluxes in surface waters of the bays of Cardenas, West Santa Clara, Puerto Sagua la Grande, San Juan de los Remedios, Buenavista, Perros, Jigüey and La Gloria, using an algorithm that correlates sea surface temperature (SST) and the air-water pressure gradient $\Delta p\text{CO}_2$. Between 2010 and 2011, the partial pressure of gas in the water and the fluxes in Jigüey Bay were calculated from direct measurements of pH and total alkalinity. Most bays acted as sources of CO₂ to the atmosphere in the dry season, and as gas sinks during the rainy season. The rate of carbon uptake from the atmosphere by water surface layer in the bays was higher than that of emission into the atmosphere, except in La Gloria Bay.

Palabras clave: dióxido de carbono, presión, flujos, mar.

Keywords: carbon dioxide, pressure, fluxes, sea.

INTRODUCCIÓN

Las investigaciones sistemáticas en la zona nororiental de la plataforma marina cubana, Archipiélago Sabana-Camagüey (ASC) comenzaron en la década de los años setenta del pasado siglo. En el ASC, los estudios de la dinámica del CO₂ fueron nulos, sólo se realizaron aisladas mediciones del pH en algunas bahías.

La distribución de la alcalinidad total (AT) superficial del mar es problemática, porque en la mayoría de los mares los datos de AT son muy limitados, comparados con las mediciones de salinidad superficial del mar SSM y temperatura superficial del mar TSM, que son de una magnitud muy superior en varios órdenes (Lee *et al.*, 2006 y 2008).

A partir de las observaciones de TSM y SSM, se puede estimar la alcalinidad total, el pH y el gradiente de presión de CO₂ agua-atmósfera ($\Delta p\text{CO}_2$). En el caso de contar sólo con mediciones de pH superficial, se puede utilizar el concepto de alcalinidad normalizada por unidad de salinidad (AT/S) para estimar AT a partir de la salinidad y de

datos históricos de alcalinidad normalizada y la alcalinidad específica, para finalmente calcular variables como la presión parcial de dióxido de carbono $p\text{CO}_2$, del agua superficial y con ella el flujo de CO_2 agua-aire (Álvarez-Borrego, 2007). La correlación pH-densidad puede ser útil en el desarrollo de algoritmos que relacionen el contenido de CO_2 con imágenes de satélite y datos de flujo continuo (Hernández-Ayón *et al.*, 2003). Por medio de la modelación, se ha podido reconstruir escenarios pasados de gradientes de presión de CO_2 aire-agua y flujos de CO_2 , en zonas ecuatoriales y polares (Martínez, 2005; y Omar y Olsen, 2006) y estimar los flujos de CO_2 atmósfera – agua en el Caribe colombiano (Rojas-Higuera y Pabón, 1997). Los flujos de CO_2 en las plataformas marinas son significativos en el actual ciclo global del carbono, se estima que estas absorben el 21% del CO_2 atmosférico, $\sim 0,3 \text{ PgC año}^{-1}$, y todos los océanos que secuestran $1,4 \text{ PgC año}^{-1}$ (Borges, 2011).

El objetivo de este trabajo fue construir los escenarios pasados del gradiente de presión de CO_2 aire-agua y flujos dióxido de carbono, en las aguas superficiales de algunas bahías de plataforma marina nororiental de Cuba (ASC), entre 1975 y el 2005, por medio de un algoritmo que relaciona la TSM con $\Delta p\text{CO}_2$ y entre los años 2010 y 2011, a partir de las mediciones de pH y alcalinidad total, calcular la presión parcial del gas en el agua y los flujos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio.

El Archipiélago Sabana-Camagüey se localiza entre los $21^{\circ}25' \text{ N}$ y $77^{\circ}00' \text{ W}$, y $23^{\circ}20' \text{ N}$ y $81^{\circ}30' \text{ W}$. Consta de 2515 cayos e islotes distribuidos fundamentalmente en el borde de la plataforma, este cordón suele limitar la libre comunicación con el océano abierto, y a su vez subdivide el cuerpo de agua en bahías de escasa profundidad. La red de puntos de muestreo en las bahías objeto de estudio se representa en la Figura 1.

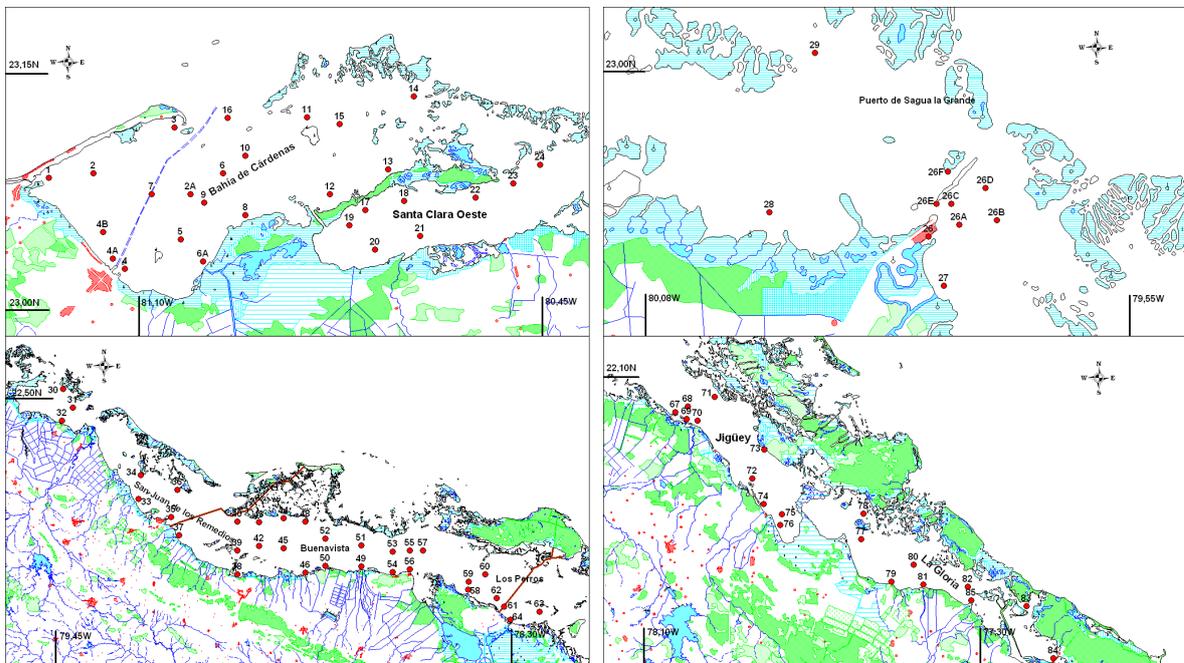


Figura 1. Red de estaciones de muestreo en las bahías del Archipiélago Sabana-Camagüey estudiadas entre los años 1991 y 2011.

Figure 1. Network of sampling stations in Sabana-Camagüey Archipelago bays studied between 1991 and 2011.

Se utilizaron los valores de temperatura superficial del mar y velocidad del viento, de los proyectos de investigaciones GEF/PNUD CUB/98/G31 y GEF/PNUD CUB/98/G32 y “Diagnóstico de la situación ambiental existente en la bahía de Jigüey en relación con la problemática de intoxicación alimentaria de origen marino” (Loza *et al.*, 2006), para calcular la diferencia o gradiente de presión (ΔpCO_2) entre la presión del gas en agua y la presión del gas en la atmósfera, a partir de la temperatura superficial del mar (Chávez *et al.*, 1999):

$$\Delta pCO_2 = -14,727TSM + 429,81$$

Donde: **TSM**: temperatura superficial del mar.

La presión parcial del dióxido de carbono en el agua (pCO_2) se calculó a partir de ΔpCO_2 y la presión parcial del gas en la atmósfera para los años 70 y 90 del siglo pasado, así como la primera década del siglo XXI (IPCC, 2007).

Para la evaluación del flujo de dióxido de carbono atmósfera-superficie del mar se empleó la ecuación que relaciona la velocidad del viento y el intercambio de gas en la superficie del mar (Wanninkhof, 1992).

$$F = k \alpha (pCO_{2\text{agua}} - pCO_{2\text{atm}}) = k \alpha (\Delta pCO_2)$$

$$k = 0,31u^2 \left(\frac{Sc}{660} \right)^{-1/2}$$

Donde: α es la solubilidad del CO_2 , expresada en unidades de (concentración/presión), u^2 es la velocidad del viento en m/seg, y **Sc** es el número de Schmidt, en función de la temperatura del agua en °C.

En la bahía Jigüey entre los años 2010 y 2011, a partir de las mediciones de pH y alcalinidad total, se calculó la presión parcial de dióxido de carbono (pCO_2) de acuerdo a Millero y Soan (1992).

El uso del oxígeno aparente (UOA) se calculó por diferencia entre la concentración de saturación de oxígeno y el oxígeno disuelto medido en las campañas oceanográficas (Millero y Soan, 1992).

El análisis estadístico se realizó mediante los programas Excel 2003 y Statistica 7 y mediante MapInfo Professional 9.0, se realizó la distribución espacial de los parámetros.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las aguas de la bahía de Cárdenas, la de diferencia entre la presión parcial de dióxido de carbono entre la capa superficial del mar y la atmósfera (ΔpCO_2), tuvo signo positivo en los muestreos realizados en mayo/2001 y mayo/2001, mientras que en julio/2005; ΔpCO_2 fue negativo en toda la bahía. Hubo un predominio de valores de presión parcial de dióxido de carbono (pCO_2) superior al atmosférico, en los muestreos hechos al finalizar la temporada de seca de los años 1997, 2001 y 2002 (Fig. 2). En julio/2005 la presión parcial del gas en el agua pCO_2 , fluctuó entre 138 μatm y 341 μatm , estos valores fueron inferiores al valor global reportado por el IPCC (2007) en la atmósfera, durante la primera mitad de la pasada década (~380 μatm). La distribución espacial de ΔpCO_2 y pCO_2 , no tuvo patrones de distribución definidos, en mayo/2001 los valores mayores de ambos parámetros se encontraron al suroeste y zona norte del lóbulo oriental (Fig. 2). En mayo/2002 el gradiente de presión de CO_2 y la presión del gas en el agua fueron mayores en la parte noreste de la bahía, la región central del área oriental se caracterizó por los bajos valores de ΔpCO_2 y pCO_2 (Fig. 2). En julio/2005 los

mayores valores del gradiente de presión y presión de dióxido de carbono se encontraron en las zonas que van desde el inicio de la Península de Hicacos a la ciudad de Cárdenas, la próxima a la desembocadura del Canal de Roque y la ubicada al NE de la bahía de Santa Clara Oeste. No hubo una relación aparente entre la presión del gas en agua y la zona con cobertura de pastos marinos, ya que estos vegetales pueden utilizar el dióxido de carbono disuelto en el agua y el aportado por el ión bicarbonato. La densidad de biomasa foliar de pastos fue nula en la parte SW de la bahía (Martínez – Darana, 2007). Las angiospermas marinas cuando realizan la fotosíntesis emplean tanto el CO₂ disuelto como el aportado por el bicarbonato (Larkum *et al.*, 2006 y Hendriks *et al.*, 2010)

Los mayores flujos de CO₂ entre la atmósfera y la superficie del agua, fueron en mayo/2002 (Tabla 1), con un valor medio de 87 ± 28 mmol CO₂ m⁻² d⁻¹, equivalente a 516×10^4 moles C d⁻¹, también en mayo/2001, los flujos se dirigieron desde el agua hacia la atmósfera, y en julio/2005 la bahía absorbió -789×10^4 moles C d⁻¹. Las cantidades de CO₂ que emitió o absorbió la bahía estuvieron condicionados por factores físicos (velocidad del viento, TSM), químicos (equilibrio entre las especies de carbono inorgánico) y biológicos (producción primaria y respiración). Aunque en todos los muestreos el uso del oxígeno aparente (UOA), se puso de manifiesto, no hubo una marcada relación entre el mismo y los flujos de dióxido de carbono, la mayor tasa de UOA fue mayo/2001, muestreo en que la bahía tuvo una baja tasa de emisión de dióxido de carbono hacia la atmósfera, y en julio/2005 la bahía se comportó como sumidero del gas, coincidiendo con un bajo valor de UOA (tabla 1). En esta bahía los procesos biológicos no deben ser empleados para explicar los flujos del gas entre la atmósfera y el agua. Las estimaciones del metabolismo neto del ecosistema (MNE), dieron como resultado que la porción Oeste se comportó de forma autotrófica en mayo del 2001 y 2002, y en la zona Este de la bahía prevaleció la fotosíntesis sobre la respiración en mayo/2002 u julio/2005 (Montalvo *et al.*, 2011).

En la bahía Santa Clara Oeste (SCO) el gradiente de presión de dióxido de carbono, fue positivo en mayo/2001 y mayo/2002, mientras que en julio/2005 tuvo signo negativo (Fig. 2). La pCO₂ en mayo/2001 y mayo/2002 tuvo valores mayores a 400 µatm (Fig. 2), a diferencia de julio/2005 en que alcanzó un valor medio de 198 ± 27 µatm. Los elevados valores de la presión parcial del gas en los muestreos hechos en los años 2001 y 2002, se asociaron a una alta UOA, (tabla 1). Por tanto, el modelo de Chavez *et al.* (1999), para la estimación del gradiente de presión de CO₂ agua-atmósfera, arrojó resultados que estuvieron relacionados con la respiración del cuerpo de agua en los muestreos realizados en los años 2001 y 2002.

La distribución horizontal por muestreos de ΔpCO_2 y pCO₂ se representa en la figura 2, en mayo/2001, los valores mayores de ambos parámetros se encontraron en el Oeste de la bahía, zona carente de pastos marinos, a diferencia de los restantes muestreos en que estos fueron superiores en la parte central y oriental, áreas donde la presencia de pastos marino fue significativa. La biomasa foliar de pastos marinos en las porciones central y oriental de la bahía SCO varió entre 43 y 250 g PS m² (Martínez – Darana, 2007).

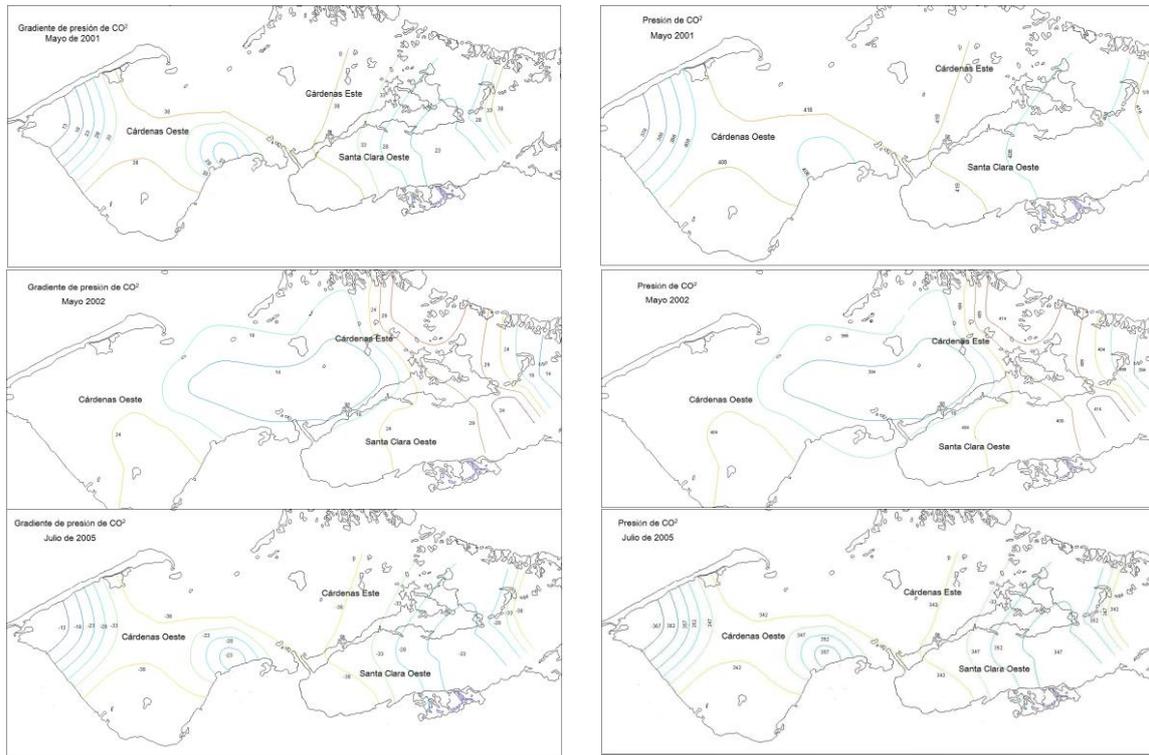


Figura 2. Distribución espacial del gradiente de presión parcial de dióxido de carbono entre el agua y la atmósfera $\Delta p\text{CO}_2$, y de la presión parcial de dióxido de carbono $p\text{CO}_2$, en las bahías de Cárdenas y Santa Clara Oeste durante mayo/2001, mayo/2002 y julio/2005.

Figure 2. Spatial distribution of carbon dioxide partial pressure gradient between water and atmosphere $\Delta p\text{CO}_2$, and of carbon dioxide partial pressure $p\text{CO}_2$ in the bays of Cardenas and West Santa Clara in May/2001, May/2002 and July/2005.

Tabla 1. Valores promedio de la utilización del oxígeno aparente UOA , y de las estimaciones mediante modelación de los flujos de dióxido de carbono F agua-atmósfera en las bahías objeto de análisis del Archipiélago Sabana-Camagüey.

Table 1. Average values of apparent oxygen utilization UOA , and of estimates by modeling carbon dioxide water-atmosphere fluxes F in the analyzed bays of Sabana-Camagüey Archipelago.

Bahía	Muestreo	UOA $\mu\text{mol/kg}$	F mol C d^{-1}
Cárdenas lóbulo Oeste	mayo-01	4,62	63×10^4
	mayo-02	0,00	136×10^4
	julio-05	1,08	-430×10^4
Cárdenas lóbulo Este	mayo-01	0,00	91×10^4
	mayo-02	4,17	77×10^4
	julio-05	0,00	-314×10^4
Santa Clara Oeste	mayo-01	16,03	74×10^4
	mayo-02	11,66	41×10^4
	julio-05	9,19	-586×10^4
Puerto de Sagua la Grande	junio-05	14,00	-84×10^4

Bahía	Muestreo	UOA μmol/kg	F mol C d ⁻¹
San Juan de los Remedios	junio-05	0,00	-365 x10 ⁴
Buenavista	junio-05	0,00	-1320 x10 ⁴
Perros	febrero-91	5,67	581 x 10 ⁴
	julio-91	0,00	-1380 x10 ⁴
	abril-92	16,15	-918 x 10 ⁴
	mayo-92	13,54	9,3 x 10 ⁴
	julio-92	9,87	-
	septiembre-92	0,79	-
	diciembre-92	51,29	-
	junio-05	0,00	-5820 x10 ⁴
Jigüey	julio-04	-	-
	abril-05	0,00	-
	diciembre-05	0,00	-
	diciembre-10	13,15	-
	septiembre-11	0,00	-386 x10 ⁴
La Gloria	abril-02	0,00	960 x 10 ⁴
	junio-05	0,00	-120 x 10 ⁴

Los flujos de CO₂ en los dos primeros muestreos se dirigieron desde el agua hacia la atmósfera, emitiendo el sistema 74 x 10⁴ moles C d⁻¹ en mayo/2001 y 41 x 10⁴ moles C d⁻¹ en mayo/2002. La bahía se comportó como sumidero del gas en julio/2005, incorporando desde la atmósfera 62 x 10⁵ moles C d⁻¹, la absorción del gas tuvo como posible causa el decrecimiento de la salinidad a consecuencia de las lluvias y del decrecimiento de la utilización del oxígeno aparente (tabla 1). Los procesos biológicos como la fotosíntesis y respiración de los diferentes tipos de productores primarios no esclarecen el carácter de sumidero o fuente de dióxido de carbono en la bahía, ya que de acuerdo a Montalvo *et al.* (2011), en los dos primeros muestreos el MNE fue autotrófico y en junio/2005 se comportó de manera heterotrófico.

El gradiente de presión en las aguas de la bahía Puerto de Sagua la Grande, tuvo signo negativo, por tanto la presión del gas en el agua fue inferior a la atmosférica, excepto en el área suroriental (Fig.3). La presión parcial de dióxido de carbono, fue inferior a 380 μatm en la mayor parte de la bahía (Fig.3), a pesar de que la considerable UOA, indicó que prevalecieron los procesos heterotróficos, e implicó una gran tasa de producción de CO₂.



Figura 3. Distribución espacial del gradiente de presión parcial de dióxido de carbono entre el agua y la atmósfera $\Delta p\text{CO}_2$, y de la presión parcial de dióxido de carbono $p\text{CO}_2$, en los muestreos realizados a la bahía Puerto de Sagua la Grande en junio/2005.

Figure 3. Spatial distribution of carbon dioxide partial pressure gradient between water and atmosphere $\Delta p\text{CO}_2$, and of carbon dioxide partial pressure $p\text{CO}_2$ during samplings carried out in Puerto Sagua la Grande Bay in June/2005.

Las bajas presiones del gas no guardaron correspondencia con los parámetros hidrofísicos como la temperatura del agua y velocidad del viento, pero sí con la baja salinidad que alcanzó un valor medio de $33 \pm 1,2$ ups. Las entradas de agua dulce, nutrientes y materia orgánica a los ecosistemas costeros, traen un impacto negativo sobre la química de los carbonatos, ya que pueden estimular tanto los procesos autotróficos como los heterotróficos (Gypens *et al.*, 2011).

Los flujos en este muestreo variaron desde $-14,8$ a $0,3 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, que equivalieron a una incorporación promedio de 88×10^4 moles C d^{-1} . Este comportamiento contrastó con el de sistemas estuarinos de otras zonas, que por regla general se comportan como emisores del gas hacia la atmósfera. Zhai y Dai (2009) reportaron que en épocas en que prevalecen los procesos de producción primaria un estuario se comporta como sumidero del CO_2 atmosférico y en la etapa en que se recicla la materia orgánica este tipo de ecosistema costero actúa como emisor de CO_2 hacia la atmósfera.

De la Paz *et al.*, (2007) reportó que el estuario del río Guadalquivir en España, emite a la atmósfera $3,2 \times 10^6$ moles C d⁻¹.

En las bahías San Juan de los Remedios (SJR) y Buenavista, los valores puntuales en junio/2005 fueron negativos de $\Delta p\text{CO}_2$ (Fig. 4), e indicaron que la $p\text{CO}_2$ fue inferior al valor global que había en la atmósfera. En la primera los mayores valores del gradiente de presión y presión parcial del gas se encontraron en la parte occidental de la bahía y en la zona ubicada entre la ciudad de Caibarién y el pedraplén que une la isla con Cayo Santa María. En este muestreo, el valor nulo de la UOA (tabla 1), indicó que hubo sobresaturaciones de oxígeno asociadas una elevada producción primaria, disminuyendo la tensión del dióxido de carbono en agua, algo que facilitó la difusión del gas desde la atmósfera a la capa superficial del agua.

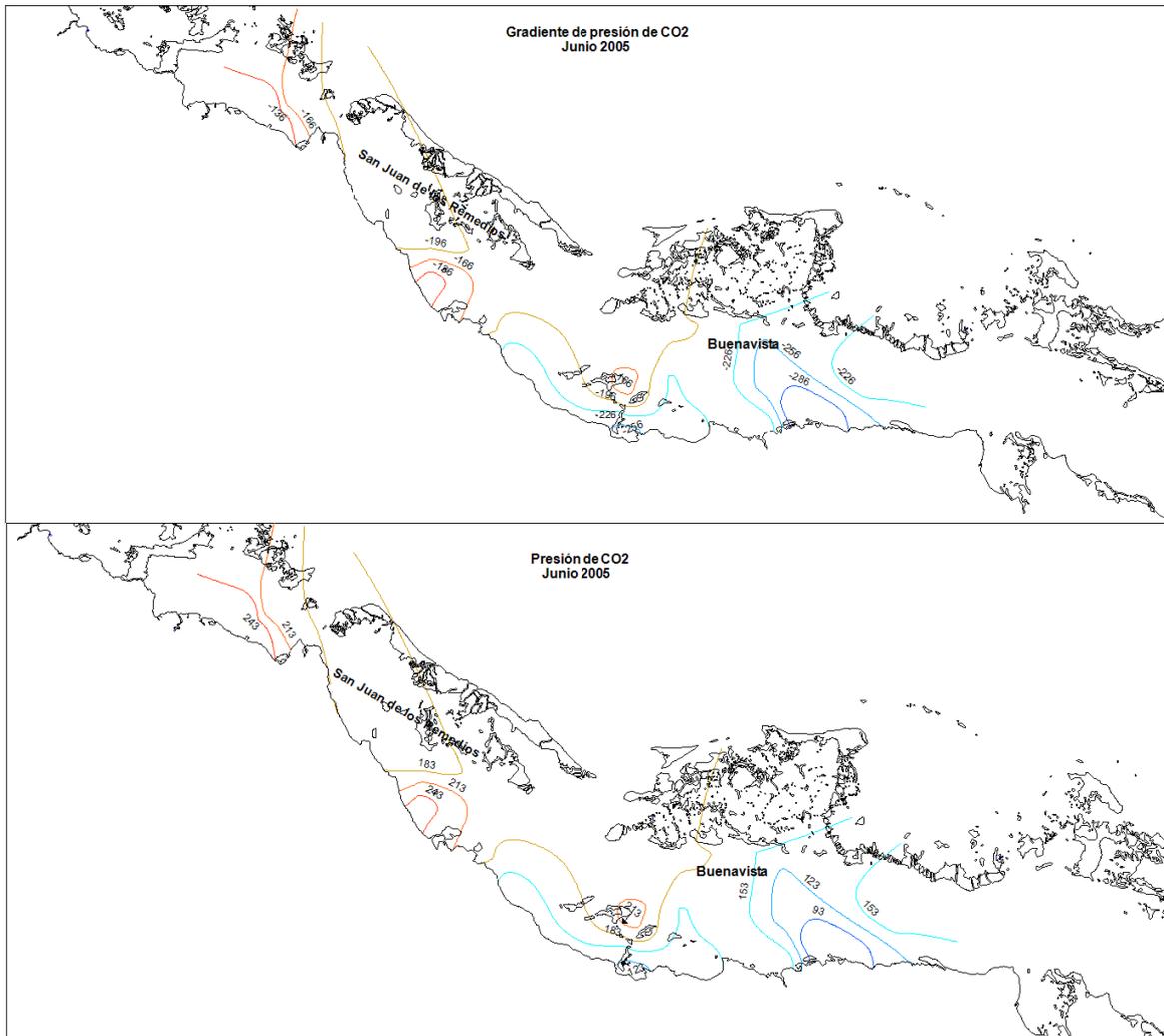


Figura 4. Distribución espacial del gradiente de presión parcial de dióxido de carbono entre el agua y la atmósfera $\Delta p\text{CO}_2$, y de la presión parcial de dióxido de carbono $p\text{CO}_2$, en los muestreos realizados a las bahías San Juan de los Remedios y Buenavista en junio/2005.

Figure 4. Spatial distribution of carbon dioxide partial pressure gradient between water and atmosphere $\Delta p\text{CO}_2$, and of carbon dioxide partial pressure $p\text{CO}_2$ during samplings carried out in San Juan de los Remedios and Buenavista bays in June/2005.

La bahía SJR se comportó como sumidero de CO₂ desde la atmósfera. El flujo del gas atmósfera-agua incorporó 365 x 10⁴ moles C d⁻¹, y la bahía de Buenavista tuvo una absorción promedio de CO₂ de 1320 x 10⁴ moles C d⁻¹. No obstante, deben existir períodos donde prevalezca el metabolismo heterotrófico en la bahía y el sistema opere como fuente del gas. Oschlies y Kähler (2004), concluyeron que hay una estrecha relación entre los procesos de producción primaria y la mineralización de la materia orgánica, que llevan a cabo la biota marina, y los flujos de CO₂ aire-agua.

Los valores de ΔpCO₂ en la bahía de Perros fueron positivos en la mayoría de los casos, excepto en junio/1991 y junio/2005, la distribución espacio temporal fue muy variada (Tabla -2). Los altos valores de pCO₂, fueron comunes, aunque no tuvo un comportamiento espacial y estacional definido (Tabla -2). En los años 90 del pasado siglo hubo una tendencia a que los valores superiores del gradiente de presión y presión parcial de CO₂ en el agua se encontraran en las zonas más próximas al cordón de cayos que conforman la frontera Norte de la bahía, a diferencia de junio/2005 en ΔpCO₂ y la pCO₂ fue mayor en las zonas aledañas a la línea costera Sur de la bahía.

Tabla 2. Valores promedio, desviación estándar DE, mínimo y máximo del gradiente de presión parcial de dióxido de carbono entre el agua y la atmósfera ΔpCO₂, y de la presión parcial de dióxido de carbono pCO₂, en los muestreos realizados a la bahía de Perros en febrero/1991, julio/1991, abril/1992, mayo/1992, julio/1992, septiembre/1992, diciembre/1992 y junio/2005 (expresadas en μatm).

Table 2. Average value, standard deviation DE, minima and maxima of carbon dioxide partial pressure gradient between water and atmosphere ΔpCO₂, and of carbon dioxide partial pressure pCO₂, during samplings carried out in Perros Bay in February/1991, July/1991, April/1992, May/1992, July/1992, September/1992, December/1992 and June/2005 (expressed in μatm).

Muestreo	Parámetro	Promedio	DE	Mínimo	Máximo
febrero/1991	ΔpCO ₂	134	216	-163	372
	pCO ₂	514	216	217	752
julio/1991	ΔpCO ₂	-128	56	-188	-38
	pCO ₂	192	56	132	282
abril/1992	ΔpCO ₂	59	192	-212	375
	pCO ₂	379	192	108	695
julio/1992	ΔpCO ₂	-34	6	-41	-19
	pCO ₂	326	6	319	341
septiembre/1992	ΔpCO ₂	50	152	-155	249
	pCO ₂	370	152	165	569
diciembre/1992	ΔpCO ₂	863	623	225	1737
	pCO ₂	1183	623	545	2057
junio/2005	ΔpCO ₂	-195	43	-244	-144
	pCO ₂	185	43	136	236

Hubo una tendencia a la vinculación de la presión de dióxido de carbono en agua con la UOA, sugiriendo que la relación producción primara-respiración (p-r), en la mayoría de los muestreos fue negativa, y por tanto prevaleció el comportamiento heterotrófico, aumentando la presión parcial de dióxido de carbono en agua. Las sub-saturaciones de oxígeno y la gran de disponibilidad de materia orgánica en la bahía fueron usuales. Pina *et al.* (2001) y González de Zayas *et al.* (2002 y 2005) demostraron en estudios posteriores, que el cuerpo de agua tuvo una marcada tendencia a la sobresaturación del

agua en oxígeno, y que las concentraciones de DQO más usuales fueron $> 3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, no siempre vinculados a sobresaturaciones de oxígeno.

En la bahía de Perros los flujos de CO_2 sólo se cuantificaron en febrero y julio de 1991, mayo de 1992 y junio de 2005. Conforme al signo del flujo, el sistema actuó como emisor del gas en febrero/1991 y mayo/1992 (Tabla 1). No obstante, aunque no se dispuso de mediciones de velocidad del viento, en los muestreos hechos en julio, septiembre y diciembre de 1992, el predominio de valores positivos $\Delta p\text{CO}_2$ en los últimos muestreos de 1992 (Tabla -2), corroboran que la bahía pudo haberse comportado como fuente del gas hacia la atmósfera. Existe una incertidumbre sobre la influencia de la zona marino costera sobre los flujos anuales de CO_2 aire-mar, y se conoce bien que hay un gran desequilibrio entre la $p\text{CO}_2$ aire-mar, alcanzando desde $\sim 400 \mu\text{atm}$ por encima de la saturación atmosférica hasta $\sim 250 \mu\text{atm}$ por debajo de la misma, por lo que estas regiones también pueden comportarse como sumidero de CO_2 (Ianson *et al.*, 2009). Wanninkhof *et al.* (2011), plantearon que para el estudio de los flujos de CO_2 aire-agua, el efecto de la TSM sobre el efecto de la presión parcial de dióxido de carbono es especulativo, ya que los flujos están condicionados fundamentalmente por la velocidad de viento.

La diferencia de presión de CO_2 entre el agua y la atmósfera, en la Bahía Jigüey tuvo valores medios positivos en los muestreos realizados entre julio/2004 y diciembre/2005, en los estudios realizados en el 2010 y 2011, el signo de $\Delta p\text{CO}_2$ fue negativo, la variabilidad en todos los casos fue alta (Tabla -3). La presión de dióxido de carbono, tuvo una gran variabilidad en el tiempo (Tabla -3), en los tres primeros cruceros los valores más comunes fueron superiores a $400 \mu\text{atm}$, y en los últimos prevalecieron los valores inferiores a esta cifra.

Tabla 3. Valores promedio, desviación estándar DE, mínimo y máximo del gradiente de presión parcial de dióxido de carbono entre el agua y la atmósfera $\Delta p\text{CO}_2$, y de la presión parcial de dióxido de carbono $p\text{CO}_2$, en los muestreos realizados a la bahía Jigüey en julio/2004, abril/2005, diciembre/2005, diciembre/2010 y septiembre/2011 (expresadas en μatm).

Table 3. Average value, standard deviation DE, minima and maxima of carbon dioxide partial pressure gradient between water and atmosphere $\Delta p\text{CO}_2$, and of carbon dioxide partial pressure $p\text{CO}_2$, during samplings carried out in Jigüey Bay in July/2004, April/2005, December/2005, December/2010 and September/2011 (expressed in μatm).

Muestreo	Parámetro	Promedio	DE	Mínimo	Máximo
julio/2004	$\Delta p\text{CO}_2$	251	217	88	674
	$p\text{CO}_2$	631	217	468	1054
abril/2005	$\Delta p\text{CO}_2$	137	493	-290	1226
	$p\text{CO}_2$	517	493	90	1606
diciembre/2005	$\Delta p\text{CO}_2$	327	57	258	396
	$p\text{CO}_2$	707	57	638	776
diciembre/2010	$\Delta p\text{CO}_2$	-126	210	-291	320
	$p\text{CO}_2$	264	210	99	710
septiembre/2011	$\Delta p\text{CO}_2$	-307	52	-369	-217
	$p\text{CO}_2$	83	52	21	173

La distribución espacial del $\Delta p\text{CO}_2$ entre los años 2004 – 2005 tuvo un comportamiento diferente entre los cruceros. En junio/2004, los valores superiores se encontraron al noroeste de la bahía, en abril/2005 fue muy elevado al suroeste y en

diciembre/2005 los valores mayores se encontraron al Sur del cuerpo de agua. La distribución de la presión del gas en el agua siguió el mismo patrón. En la etapa 2010 - 2011 los valores más pequeños del gradiente de presión y de la presión de dióxido de carbono en agua se hallaron en la zona que estaba próxima al pedraplén que enlaza la isla de Cuba con Cayo Romano. Las altas presiones de CO₂ en agua, en estas regiones de la bahía tuvieron como posible causa una baja producción primaria y una mayor disponibilidad de material detrítico en un área muy marginal que favorece la remineralización de la materia orgánica liberando cantidades considerables de CO₂. La elevada carga orgánica existente en la bahía pudiera ser el resultado del material acumulado y el producido por el propio sistema, ya que esta se comportó como una trampa de materia orgánica e inorgánica (Loza *et al.*, 2006 y Carmenate *et al.*, 2011).

Entre los años 2004 y 2005 no se realizaron mediciones de la velocidad del viento en la bahía Jigüey, pero del signo de $\Delta p\text{CO}_2$, se infiere que el cuerpo de agua actuó como emisor del gas hacia la atmósfera, y como sumidero de dióxido de carbono en los cruceros de investigaciones practicados entre el 2010 y 2011. Sólo se realizaron mediciones de velocidad del viento en el estudio realizado en septiembre/2011, absorbiendo 386×10^4 moles C d⁻¹. Montalvo y Loza (2006) al modelar el MNE, encontraron que en julio/2004 y diciembre/2005 la bahía tuvo un comportamiento heterotrófico, aspecto que concuerda con el carácter emisor del gas hacia la atmósfera en estos muestreos. En la parte SE de la bahía, durante la etapa de estudio los valores de $p\text{CO}_2$, estuvieron asociados a valores de pH inferiores a 8,0 y altos contenidos de materia orgánica susceptible a ser biodegrada, esta fue la zona de más baja remoción del agua.

Los valores promedio del $\Delta p\text{CO}_2$ en la bahía La Gloria por muestreos fueron 96 ± 74 en abril/2005 y -196 ± 37 μatm en junio/2005. La $p\text{CO}_2$, fue desde 144 hasta 860 μatm , en abril/2002 la presión parcial del gas fue mayor a 390 μatm en todas las estaciones de muestreo, en junio/2005 se hallaron en el agua valores inferiores de $p\text{CO}_2$ a 250 μatm . En la época de seca del 2002, los menores valores del gradiente de presión de CO₂ entre la atmósfera y el agua, se encontraron en la parte de la bahía cercana a Jigüey, y en junio/2005 hubo bajos $\Delta p\text{CO}_2$ en la parte más occidental y en las zonas cercanas a los cayos que forman la frontera Norte del cuerpo de agua (Fig. 5). El patrón de distribución espacial de la presión de CO₂ en agua fue similar al de $\Delta p\text{CO}_2$.

En abril/2002 la bahía La Gloria se comportó como fuente de CO₂, aportando a la atmósfera 960×10^4 moles C d⁻¹, y en junio/2005 actuó como sumidero del gas, con un flujo neto de carbono inorgánico desde la atmósfera al agua fue 120×10^4 moles C d⁻¹. En el muestreo realizado en la etapa de seca del 2002, la bahía tuvo un comportamiento heterotrófico, aspecto que favoreció la generación de CO₂ a expensas de las oxidaciones microbiológicas de la materia orgánica en agua y sedimento, a diferencia de la etapa de lluvias del 2005 en que hubo un consumo del gas por los productores primarios, bajando la tensión en la columna de agua. De acuerdo a la modelación del MNE (producción primaria – respiración) en abril/2005 para el fitoplancton y los pastos marinos fue $-0,13$ y $-0,59$ $\text{mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ y en junio/2005 los valores para estos productores primarios fueron $0,01$ y $0,04$ $\text{mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (Montalvo *et al.*, 2011).

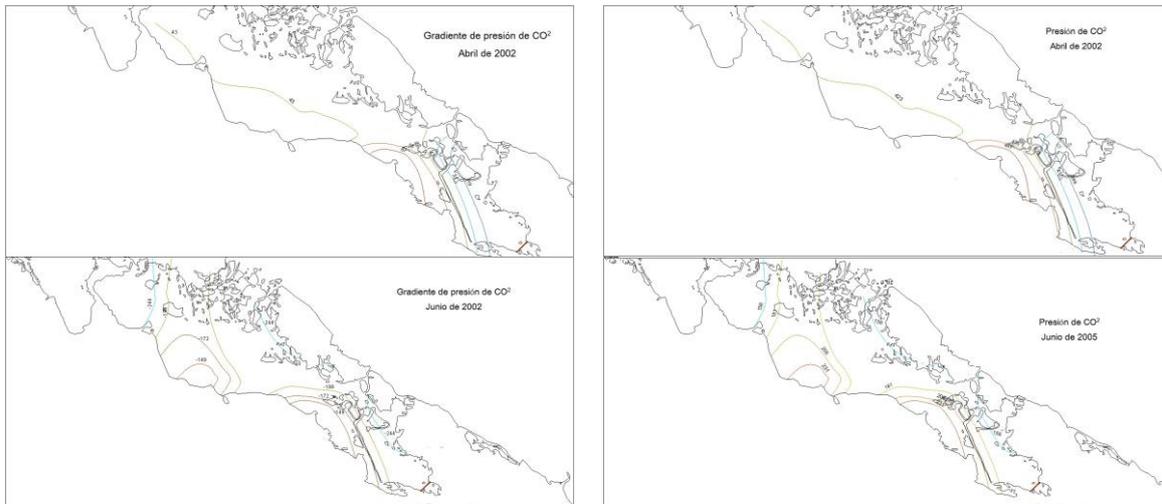


Figura 5. Distribución espacial del gradiente de presión parcial de dióxido de carbono entre el agua y la atmósfera $\Delta p\text{CO}_2$ y de la presión parcial de dióxido de carbono $p\text{CO}_2$, en los muestreos realizados a la bahía La Gloria en abril/2002 y junio/2005.

Figure 5. Spatial distribution of carbon dioxide partial pressure gradient between water and atmosphere $\Delta p\text{CO}_2$, and of carbon dioxide partial pressure $p\text{CO}_2$ during samplings carried out in La Gloria Bay in April/2002 and June/2005.

CONCLUSIONES

- La distribución espacio-temporal del gradiente de presión y la presión de dióxido de carbono en las aguas de las bahías fue muy heterogénea, prevalecieron los altos valores en zonas cercanas a la isla de Cuba y al cordón de cayos que forman la frontera norte de las bahías.
- Las bahías manifestaron una tendencia a comportarse como fuentes de CO_2 a la atmósfera en la etapa climática de seca y actuar como sumidero del gas en la etapa de lluvias.
- La magnitud de los flujos de carbón desde la atmósfera a la capa superficial del agua en las bahías, fueron superiores a los del agua hacia la atmósfera, por lo que prevaleció el carácter de sumidero de CO_2 sobre el de fuente. No obstante, los resultados no pueden generalizarse ya que no se analizaron series de tiempo consecutivas, para explicar de forma satisfactoria los flujos.

REFERENCIAS

- Álvarez-Borrego, S. (2007). Principios generales del ciclo del carbono en el océano. En, Hernández-de la Torre B, Gaxiola-Castro G (eds.), *Carbono en ecosistemas marinos de México*. INE, Semarnat, CICESE, México. 11-28. pp.
- Borges, A. V. (2011). Chapter 3. Present Day Carbon Dioxide Fluxes in the Coastal Ocean and Possible Feedbacks Under Global Change. In: P. Duarte and J. M. Santana-Casiano (Eds.), *Oceans and the Atmospheric Carbon Content*. 47-77 pp. DOI 10.1007/978-90-481-9821-4_3, © Springer Science+Business Media B.V. 2011.
- Carmenate, M., Sánchez, M., Cantelar, K., Montalvo, J. F., García, I., Esponda, S. C. Hernández, J. L., Esquivel, M., & Loza, S. 2011. Calidad ambiental de la bahía de Jigüey (NE de Cuba) y su relación con intoxicaciones alimentarias de origen marino. *Serie Oceanológica*. No.9, 42-53. ISSN 2072-800x.

- Chavez, F., Strutton, P., Friederich, G., Feely, R., Feldman, F., Foley, D. & McPhaden, M. (1999). Biological and chemical response of the Equatorial Pacific Ocean to the 1997-98 El Niño. *Science*, 286, 2126-2131.
- De la Paz, M., Gómez-Parra, A., & Forja, J. (2007). Inorganic carbon dynamic and air-water CO₂ exchange in the Gualdalquivir Estuary (SW Iberian Peninsula). *Journal of Marine Systems*. 68, 265-277.
- González de Zayas, R., Pina, F., Clero, L., Hernández, L., Hernández, L., & González, J. (2002). Monitoreo de los ecosistemas marinos de la cayería norte de Ciego de Ávila, en el período poco lluvioso del 2002. (Inédito). Informe del proyecto PNUD/GEF CUB/98/G32. 21 p., 2 figuras.
- González de Zayas, R., Hernández, L., Pina, F., Hernández, L., Clero, L., Martín, F., Acosta de la Red, W., Álvarez, Y., & González, J. (2005). Monitoreo de los ecosistemas marinos de la cayería norte de Ciego de Ávila. (Inédito). Informe del proyecto PNUD/GEF CUB/98/G32. 31 p., 23 figuras, 2 tablas.
- Gypens, N., Lacroix, G., Lancelot, C., & Borges, A. V. (2011). Seasonal and inter-annual variability of air-sea CO₂ fluxes and seawater carbonate chemistry in the Southern North Sea. *Progress in Oceanography*. 88, 59-77.
- Hendriks, I. E., Duarte, C. M., & Álvarez, M. (2010). Vulnerability of marine biodiversity to ocean acidification: A meta-analysis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 86, 157-164.
- Ianson, D., Feely, R. A., Sabine, C. L., & Juaranek, W. (2009). Features of Coastal Upwelling Regions that Determine Net Air-Sea CO₂ Flux. *Journal of Oceanography*, 65, 677 - 687.
- Larkum, A. W. D., Drew, E. A., & Ralph, P. J. (2006). Photosynthesis and metabolism in seagrasses at the cellular level. In: A.W.D., Larkum, R.J., Orth, & C.M. Duarte, (Eds.), *Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, 323-345 pp.
- Lee, K., Tong, L. T., Sillero, F. J., Sabine, C. L., Dickson, A. G., Goyet, C., Park, G-H., Wanninkhof, R., Feely, R. A., & Key, R. M. (2006). Global relationships of total alkalinity with salinity and temperature in surface waters of world's oceans. *Geophysical research letters*. Vol. 33, L19605, doi: 10.1029/2006GL02707, 2006.
- Lee, H-W., Lee, K., & Lee, B-Y. (2008). Prediction of surface ocean pCO₂ from observations of salinity, temperature and nitrate, the empirical model perspective. *Ocean Science Journal*. 43, 195-208.
- Loza, S., Montalvo, J. F., Cantelar, K., Sánchez, M., García, I., César, M. E., Esponda, S. C., Martínez, C., Carmenate, M., Hernández, J. L., Esquivel, M., & Núñez, R. (2006). Informe final del proyecto "Diagnóstico de la situación ambiental existente en la bahía de Jigüey (NE de Cuba) en relación con la problemática de intoxicación alimentaria de origen marino". (Inédito) 43 p.
- Martínez, J. I. (2005). Reconstrucción de las presiones parciales de CO₂ y nitratos en el Pacífico oriental para los últimos 150000 años. *Dyna*. 131:33-39. www2.unalmed.edu.co
- Martínez-Darana, B. R. (2007). Características y estado de conservación de los pastos marinos en áreas de interés del Archipiélago Sabana-Camagüey, Cuba. Tesis en opción del grado científico de Doctor en Ciencias Biológicas. Universidad de la Habana. ISBN 978-959-298-014-3.
- Millero, F. J., & Soan, M. L. (1992). *Chemical Oceanography*. CRC Press 531 pp.
- Montalvo, J. F., & Loza, S. (2006). Flujos de materiales conservativos y no conservativos en la Bahía de Jigüey (Archipiélago Sabana-Camagüey, Cuba) y el océano. *Serie Oceanológica*. No. 2, 1-10. ISSN 2072-800x.

- Montalvo, J. F., García, I., Esponda, S. C., López, D., Martínez, M., Albuquerque, O. C., García, R., Blanco, M., & García, N. (2009a). Estudios preeliminares de compuestos del ciclo del CO₂ en algunas áreas costeras de la plataforma cubana. *Serie Oceanológica*. No. 6, 65-78. ISSN 2072-800x.
- Montalvo, J. F., García, I., Almeida, M., & Esponda, S. C. (2011). Flujos de agua, sal y materiales no conservativos en tres bahías (Cárdenas, Santa Clara Oeste y La Gloria) del Archipiélago Sabana-Camagüey y el mar abierto. *Serie Oceanológica*. No 9, 30-41. ISSN 2072-800x.
- Omar, A. M., & Olsen, A. (2006). Reconstructing the time history of the air-sea CO₂ disequilibrium and its rate of change in the eastern subpolar North Atlantic, 1972–1989, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L04602, doi: 10.1029/2005GL025425.
- Oschlies, A., & Kähler, P. (2004). Biotic contribution to air-sea fluxes of CO₂ and O₂ and its relation to new production, export production, and net community production. *Global Biogeochem. Cycles*, 18, GB1015, doi: 10.1029/2003GB002094.
- Pina, F., González de Zayas, R., Hernández, L., & Gómez, M. (2001). Monitoreo de la cayería norte de Ciego de Ávila. (Inédito). Informe del proyecto PNUD/GEF CUB/98/G32. 19 p., 1 tabla.
- Wanninkhof, R. (1992). Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean. *Journal of geophysical research*. 97, 7373-7382.
- Wanninkhof, R., Park, G.-H., Chelton, D. B., & Risien, C. M. (2011). Impact of small-scale variability on air–sea CO₂ fluxes. Section 6, *Global Air-Sea CO₂ Fluxes*. 431-444 pp.
- Zhai, W., & Dai, M. (2009). On the seasonal variation of air – sea CO₂ fluxes in the outer Changjiang (Yangtze River) Estuary, East China Sea. *Marine Chemistry*. 117, 2–10.

Recibido: diciembre de 2012.

Aceptado: septiembre de 2013.