

PRODUCCIÓN PRIMARIA FITOPLANTONICA Y METABOLISMO DURANTE UNA ÉPOCA LLUVIOSA EN UNA LAGUNA COSTERA ESTUARINA TROPICAL. CIÉNAGA GRANDE DE SANTA MARTA

PRIMARY PRODUCTIVITY OF PHYCOPLANKTON AND METABOLISM DURING A RAINY IN TROPICAL ESTUARINE COASTAL LAGOON. CIENAGA GRANDE DE SANTA MARTA

Cristian Granados Martínez, Johan Rodríguez Chila y Héctor López Salgado

RESUMEN

Se analizaron las condiciones ambientales y biológicas en cuatro estaciones de la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM): Boca de la Barra (BA), Boca del río Sevilla (SE), Centro de la CGSM (CE), Caño Grande (CG), su relación con la Producción Primaria Fitoplanctónica (PPF) y el metabolismo del sistema. Se encontró que el sistema lagunar-estuarino, tropical CGSM está grandemente influenciado por la entrada de agua dulce de los ríos, que abastecen al sistema durante las temporadas de lluvias, donde las concentraciones de nutrientes (amonio, nitritos y fosfatos), en general, fueron superiores cuando la salinidad descendió. En términos generales, la Respiración (R) fue superior a la PPF. Este patrón puede ser explicado por el aporte de agua dulce. Se encontró que existe una gran tendencia a la heterotrofia, con un 65%, contrastando con un 35% de autotrofia.

PALABRAS CLAVE: Producción Primaria Fitoplanctónica, Metabolismo pelágico, Respiración pelágica, Clorofilas, Ciénaga Grande de Santa Marta

ABSTRACT

We analyzed the environmental and biological conditions in four locations of Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM): Boca de la Barra (BA), Boca del río Sevilla (SE), Centro de la CGSM (CE), Caño Grande (CG), its relationship to phytoplankton primary production (PPF) system and metabolism as well: We found that CGSM, tropical estuarine lagoon system, is greatly influenced by freshwater input from rivers that supply the system during the rainy season, where concentrations of nutrients (ammonium, nitrate and phosphate) were generally high when the salinity decreased. Overall Breathing (R) was higher than the PPF, this pattern can be explained by freshwater input. In addition, we found that there is a strong trend towards heterotrophy, with 65%, contrasting with 35% of autotrophy.

KEY WORDS: Primary production, Pelagic metabolism, Respiration, Chlorophyll, Cienaga Grande de Santa Marta

INTRODUCCIÓN

La Producción Primaria Fitoplanctónica (PPF) se define como la tasa de fijación de carbono inorgánico, o como la velocidad con que se almacena la energía, por la actividad fotosintética, en forma de sustancias orgánicas aptas de ser utilizadas como material alimenticio (Odum, 1972). La PPF tiene una gran importancia ecológica por dar inicio a la red trófica de consumidores primarios (Strickland, 1965, Odum

1972), además, mediante su estudio, se puede estimar la magnitud y la dirección de los flujos de energía de los ecosistemas. La PPF, en los sistemas acuáticos, depende de factores físicos (disponibilidad de luz y temperatura), químicos (nutrientes) y biológicos, como la biomasa fitoplanctónica, la composición de especies, la estructura de tallas y el pastoreo del zooplancton (Stearns et al., 1987; Cloern, 1991; Landry et al., 1995; Calbet y Landry, 2004).

Dirrección de los autores:

Universidad de la Guajira, Grupo de investigación EBET biolocrisiam@gmail.com, cegranados@uniguajira.edu.co. Km 5 Vía Maicao Universidad de la Guajira Tel: 7282729 Ext (249). Grupo de Investigación Intérpretes de Ecosistemas. Instituto de Investigaciones Tropicales - INTROPIC - Universidad del Magdalena, johandavid.rodriguez@gmail.com, hector.lopezS@hotmail.com.



En los sistemas lagunares-estuarinos, estos factores pueden estar relacionados con la influencia del flujo de agua dulce, que ingresa nutrientes y materiales suspendidos, que pueden afectar la disponibilidad de la luz en la columna de agua y, a su vez, generar cambios en el estado trófico, generando estados de autotrofia a heterotrofia o viceversa (Schindler et al., 1972; Howarth et al., 1996; Smith y Hollibaugh, 1997). La presión humana sobre estos ecosistemas es otro factor que afecta la PPF y el metabolismo de estos sistemas; por ejemplo, la construcción de obras que afectan el equilibrio hídrico y las descargas de aguas no tratadas. Los ecosistemas lagunares-estuarinos tropicales se caracterizan por una compleja estructura ecológica, debido a su gran variedad de hábitats, su alta diversidad biológica e importante PPF (Day et al., 1989; Bifani, 1999).

La Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) es un amplio sistema lagunar-estuarino, tropical, con alta PPF, dada principalmente por el fitoplancton (Hernández y Gocke, 1990). Como ocurre con la mayoría de estuarios tropicales en el mundo, la CGSM ha estado sometida a presiones naturales y antropogénicas que han contribuido a su deterioro gradual en las últimas décadas (Botero y Salzwedel, 1999; Twilley et al., 1999). Diferentes manipulaciones sobre el ecosistema han afectado su equilibrio hídrico con implicaciones de hipersalinización de aguas y suelos (Botero y Mancera, 1996), modificando principalmente el intercambio de aguas con el mar y la reducción de la entrada de agua dulce desde el río Magdalena. Tratando de mitigar estos problemas ambientales, entidades gubernamentales y académicas, restablecieron el régimen hídrico mediante el ingreso de agua dulce desde el río Magdalena, a través de seis caños (Clarín, Torno, Almendros y Alimentador en 1996 y Renegado y Aguas Negras en 1998), buscando contribuir a la regeneración natural del bosque de manglar, el mejoramiento de la calidad del agua y la recuperación de los recursos pesqueros (Botero y Salzwedel, 1999; INVEMAR, 2007).

Producto de monitoreos y trabajos de investigación realizados en la CGSM, actualmente existe gran información sobre el comportamiento espacial y temporal de variables fisicoquímicas y biológicas del sistema CGSM y su relación con las modificaciones hidrológicas (INVEMAR, 2000; INVEMAR, 2005; INVEMAR, 2007). No obstante, teniendo en cuenta la abundante información antes mencionada, son relativamente pocos los estudios de PPF.

Los primeros estudios detallados del comportamiento de la PPF realizados entre 1984-85 y 1987-88 (Hernández y Gocke, 1990; Hernández y Márquez, 1991), concluyeron que la CGSM es un sistema salobre muy productivo, donde la producción primaria ($1690 \text{ gCm}^{-2}\text{año}^{-1}$) es más grande que la respiración de la comunidad (R) ($700 \text{ gCm}^{-2}\text{año}^{-1}$), de tal manera que el balance entre la entrada de energía vía fitoplancton y vía subsidio es mayor que los costos de mantenimiento del ecosistema, por lo que existe un excedente de energía que es exportado en forma de abundantes recursos pesqueros (peces, moluscos y crustáceos) y como energía-materia de subsidio que entra al mar Caribe y fertiliza una amplia región costera. El objetivo principal de este estudio fue analizar las condiciones fisicoquímicas y su relación con la PPF y el metabolismo en la CGSM durante un periodo de lluvias en el año 2007.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) está localizada entre $10^{\circ}41' - 10^{\circ}59' \text{N}$ y $74^{\circ}15' - 74^{\circ}32' \text{W}$, en el área conocida también como llanura deltaica del Río Magdalena (Figura. 1). Se extiende desde el piedemonte de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) hasta el Río Magdalena. Esta ecorregión tiene un área de 450 km^2 , formando parte del delta del Río Magdalena, es un estuario delta-lagunar que presenta características hidrológicas y geomorfológicas, conformada por lagunas y humedales de manglar, unidos entre sí por una intrincada red de canales; está separada del mar por medio de la Vía Parque Nacional Natural Isla de Salamanca, que aísla casi en su totalidad a la ciénaga con el mar. La única comunicación permanente entre la ciénaga y el mar es la "Boca de la Barra". En este complejo lagunar se conjugan fuerzas físicas tales como fuertes vientos (5.0 m s^{-1}), alta temperatura ($27-30 \text{ }^{\circ}\text{C}$) y alta radiación lumínica ($1600 \text{ a } 1880 \text{ } \mu\text{moles m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), que convierten a éste en uno de los ecosistemas costeros más productivos en latitudes neotropicales. Hay dos épocas climáticas bien definidas: una época de sequía, entre diciembre y abril, que coincide con el predominio de los Vientos Alisios del noreste y favorece la penetración de agua marina por la Boca de la Barra; una época de lluvias, entre septiembre y noviembre, cuando predominan los vientos del sur y sudoeste, conocidos como "vendaval", que favorecen el transporte de agua de la ciénaga hacia el mar. Es el sistema lagunar costero más grande e importante de Colombia y el más extenso del Caribe. (Escobar, 1989, FAO, 1994; Polania et al., 2001; Gocke et al., 2003).



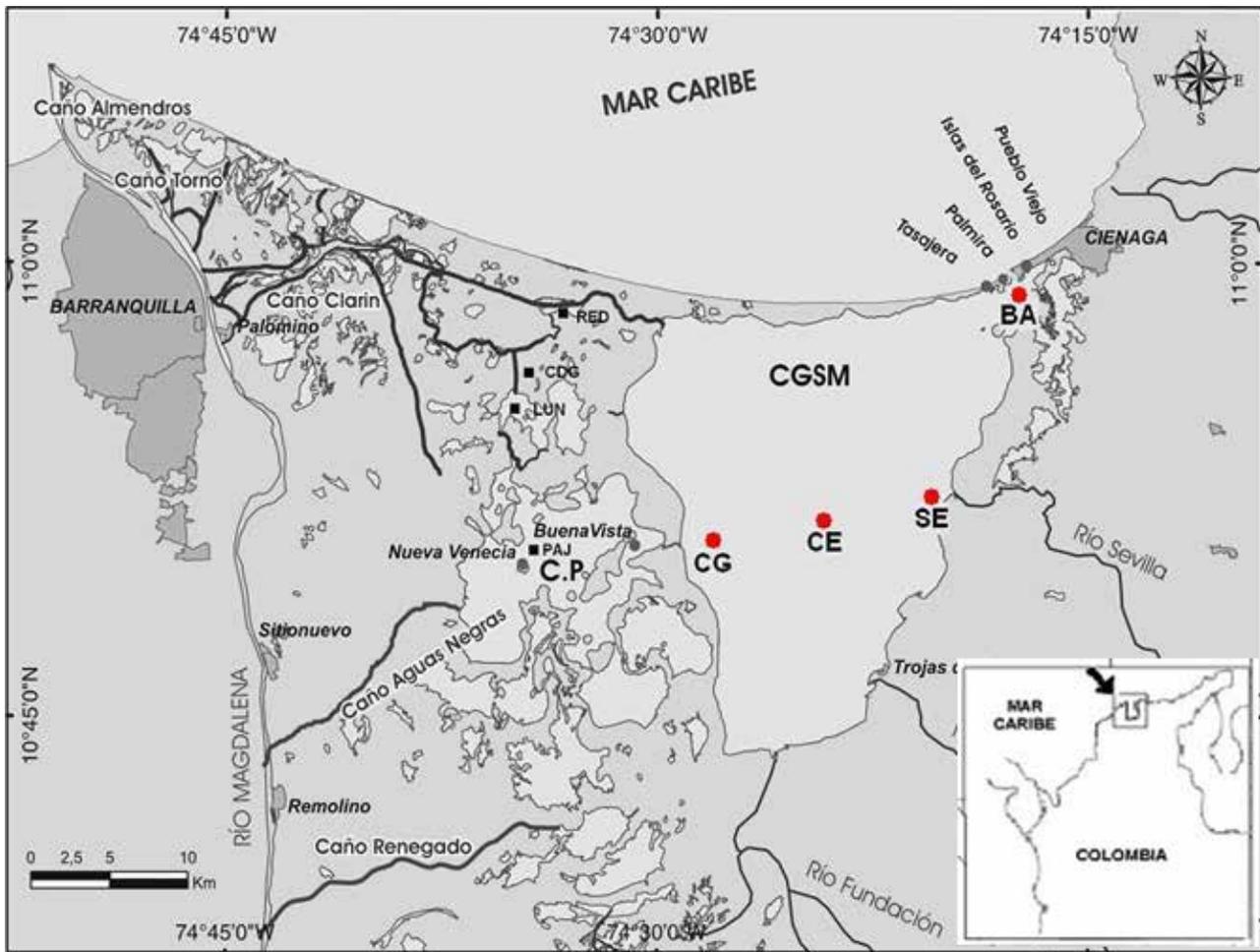


Figura 1. Localización de las estaciones de muestreo. Caño Grande (CG), Centro (CE), Río Sevilla, (SE), Boca de la Barra (BA) (Modificado de INVEMAR 2000).

Estaciones de muestreo

Se tomaron cuatro estaciones representativas de la CGSM: Boca de la Barra (BA), Boca del río Sevilla (SE), Centro de la CGSM (CE), Caño Grande (CG). La selección se basó en la influencia diferencial en el comportamiento de la salinidad (Giraldo et al., 2000; Mancera et al., 2003), la cual es considerada la variable que más rige los cambios en el sistema (INVEMAR, 2005; Blanco et al., 2006) (Figura 1).

Toma de muestras

Los muestreos se realizaron durante jornadas quincenales, distribuidas en una época de lluvia característica de la región de estudio, entre septiembre y noviembre del año 2007. Los recorridos se llevaron a cabo en lancha, con motor fuera de borda, tomando de

cada estación dos puntos geo-referenciados, debido a que, en condiciones naturales, el plancton se distribuye en parches y también con el fin de integrar la variabilidad de las estaciones. Dependiendo de la amplitud de la zona fótica, de cada punto se tomaron muestras de agua con una botella Van Dorn de 3 L (superficie, medio y fondo de la columna de agua), luego de determinar las variables fisicoquímicas. A partir de los dos puntos, las muestras de agua fueron envasadas en un recipiente de 20 L, obteniendo por estación 18 L de agua.

Variables fisicoquímicas y biológicas

La salinidad fue leída con un conductímetro WTW-LF-98, el pH con la sonda WTW-pH-98, temperatura y el oxígeno disuelto con la sonda WTW-Oxi-98. Además, se midió la profundidad del disco Secchi y la profundidad de la columna de agua. Las muestras de agua de las

estaciones de estudio fueron transportadas al laboratorio en recipientes de polietileno (600 ml). Se determinaron las concentraciones de nutrientes (NH_4^+ , NO_2^- , $\text{PO}_4^{=}$, $\text{SiO}_4^{=}$) siguiendo los procedimientos indicados en Gocke (1987) y APHA (1998) y utilizando celdas de 1 cm, en espectrofotómetro SPECTRONIC 20 GENESYS.

Clorofila *a*

A través de filtros de fibra de vidrio Whatman GF/C, de 47 mm de diámetro, se filtraron las muestras de agua. Para la extracción de los pigmentos se colocaron los filtros en acetona al 90% durante 24 h en refrigeración y en ausencia de luz. Posteriormente, los filtros se maceraron y se eliminó la turbidez mediante centrifugación a 4000 rpm durante 25 min (Lorenzen, 1967; APHA, 1998). El sobrenadante se pipeteó a celdas de 1 cm y se midió la absorbancia por medio de un espectrofotómetro SPECTRONIC 20 GENESYS, a longitudes de onda de 663 nm (mayor absorbancia de clorofila-a) y 750 nm para corrección de turbidez (Lorenzen, 1967, en APHA, 1998).

Producción primaria y respiración pelágica

Para la determinación de la PPF y la (R) se aplicó, por triplicado, el método de las botellas claras y oscuras, introducido por Gaarden y Gran (1927), el cual ha sido empleado con éxito anteriormente en la CGSM y en la Ciénaga de Pajarales (CP) (Hernández y Gocke, 1990; Rondón, 1991; Rodríguez, 2007). El método consiste en medir la producción de oxígeno en un volumen de agua, expuesto durante un tiempo determinado en botellas claras y el consumo de oxígeno o respiración en botellas oscuras (Vollenweider, 1974; Gocke, 1987). Con el fin de obtener un valor integral de PPF de la capa fótica (expresado en superficie, m^2), las botellas claras se incubaron dentro de tubos de acrílico que permitían el ingreso de intensidades de luz incidente de 100, 50, 25 y 1 %. Dichas intensidades se obtuvieron cubriendo los tubos de acrílico transparente con filtros de luz y calibrados con un luxómetro portátil (MINIPAL, MLM1010). La intensidad lumínica de 100% se obtuvo con tubo de acrílico libre de filtro. La respiración se determinó utilizando botellas Winkler que se incubaron en tubos de PVC totalmente oscuros. Se tomaron de cada estación tres replicas por cada intensidad lumínica: tres para botellas claras en las diferentes intensidades lumínicas, tres para botellas oscuras, y tres para la medición del oxígeno inicial. (4estaciones)*(4 intensidades + 1 botella oscura + 1 botella inicial) * (3 réplicas) = 72 botellas Winkler en total.

Las incubaciones se realizaron in situ entre las 11:30 y 14:30 h (3 h). Inmediatamente iniciada la incubación se fijaba el oxígeno de las botellas iniciales agregando 1 ml de sulfato de manganeso (Winkler I) y 1 de solución de yoduro de potasio-hidróxido de sodio (Winkler II) y, al finalizar, se fijaban las botellas claras y las oscuras. Posteriormente, en laboratorio, se agregaron 2 ml de ácido sulfúrico al 70% a cada botella y se titularon con solución de tiosulfato de sodio 0,01 N (previamente calibrada), siguiendo el método de Winkler, con modificaciones (Strickland y Parsons, 1972). Las titulaciones se realizaron utilizando una Bureta Digital Brand III (precisión $\pm 0,05$ ml). Con las concentraciones de oxígeno calculadas ($\text{mgO}_2 \text{ L}^{-1}$) se determinaron las producciones neta, bruta y la R.

Análisis de los datos

Se efectuaron representaciones gráficas en tiempo para cada variable por estación y gráficos de fases del balance metabólico. Para establecer la relación entre PPF, R y sus factores reguladores se acudió al análisis multivariado de componente principales con el paquete estadístico R Software®.

RESULTADOS

Variables fisicoquímicas

Los valores más altos de transparencia se registraron en la estación SE, con $102,5 \pm 12,0$ cm, mientras que el valor mínimo fue encontrado a finales de septiembre en BA, con $39,0 \pm 1,4$ cm (Tabla 1). La temperatura mostró una variación temporal muy similar durante el estudio, donde los valores más bajos coincidieron con los primeros días de noviembre para todas las estaciones y luego aumentaron a finales de noviembre, con un promedio máximo en BA ($28,35 \pm 1,39$ °C). El valor mínimo se encontró a principios de noviembre en SE ($27,0 \pm 0,3$ °C) (Tabla 1). El comportamiento del pH mostró que las estaciones CG y CE, tienden a valores neutros y ligeramente básicos, mientras que en la estación BA, los valores registrados fueron ligeramente básicos. Por otro lado, en la estación SE, se registraron valores ligeramente ácidos durante octubre y noviembre. El valor máximo de pH se observó en BA ($8,7 \pm 0,0$) y el valor mínimo en SE ($6,2 \pm 0,1$), estos dos picos de variación se registraron simultáneamente durante los primeros días de noviembre (Tabla 1).



Tabla 1. Valores promedios de las variables fisicoquímicas registradas en las estaciones de estudio en el período septiembre-diciembre de 2007. BA, Boca de la Barra; CE, Centro; CG, Caño Grande; SE, Sevilla, DE: Desviación estándar.

Estación	Fecha	Transparencia		Temperatura		pH		Oxígeno dis.		Salinidad	
		Prom.	DE	Prom.	DE	Prom.	DE	Prom.	DE	Prom.	DE
BA	27-sep.	55	4,9	29,9	0,1	8,1	0,2	6	0,7	0,7	0,4
	13-oct.	41	0	29,7	0,2	8,4	0,5	6,3	0,5	1,3	1
	02-nov.	44,5	2,1	28,6	0,1	8,7	0	7,3	0,4	0,2	0,2
	23-nov.	52,5	10,6	30,8	0,2	8,6	0	8,3	0,4	0,7	0,1
	14-dic.	39	1,4	29,7	0,1	8,4	0	6,5	0,3	0,5	0,2
CE	27-sep.	39,2	2,2	30,6	0,6	8,5	0,2	6,6	1,3	2	0,1
	13-oct.	40	1,4	29,2	0,3	8,3	0,1	5,1	0,2	1	0
	02-nov.	41,5	0,7	28	0,2	7,5	0,1	5,6	0,2	0	0
	23-nov.	85,5	3,5	30,3	0,2	8	0,1	7,3	0,2	0,4	0
	14-dic.	82,5	0,7	29,2	0,1	7,6	0,1	5,9	0,2	0,1	0
CG	27-sep.	43,2	2,4	30,5	0,3	8,1	0,1	5,7	0,6	1,5	1
	13-oct.	46	2,8	29	0,4	7,3	0,4	4,6	0,4	0,3	0,1
	02-nov.	57,5	3,5	28,2	0,5	7,7	0,2	5,5	0,8	0,3	0,1
	23-nov.	62,5	17,7	30	0,3	7,3	0,2	6,8	0,5	0,1	0,1
	14-dic.	53	14,1	29	0,1	7,2	0,1	4,8	0,5	0	0
SE	27-sep.	95,8	10	27,1	0,4	7,5	0,4	1,1	1,3	0,1	0
	13-oct.	54	7,1	27,9	0,4	6,8	0,3	3,6	1,3	0	0
	02-nov.	93	2,8	27	0,3	6,2	0,1	1,5	0,2	0	0
	23-nov.	76	0	29,8	0,9	6,9	0,5	5	1,6	0	0
	14-dic.	102,5	12	29,9	0,1	7,9	0,1	5,9	0,3	0,1	0

Los valores más bajos de OD se registraron en la estación SE, encontrando el valor mínimo a finales de septiembre ($1,1 \pm 1,3 \text{ mg.L}^{-1}$), donde solo a principios de diciembre hubo un incremento considerable ($5,9 \pm 0,3 \text{ mg.L}^{-1}$). El valor máximo se encontró a finales de noviembre en BA ($8,3 \pm 0,4 \text{ mg.L}^{-1}$) (Tabla 1). Con respecto a la salinidad, los valores más altos se observaron en la estación BA, y los valores más bajos en dos estaciones SE y CE. La salinidad osciló entre $2 \pm 0,2$ y $0,0$. El mayor valor fue encontrado a finales de septiembre en BA (Tabla 1).

Respecto a los nutrientes inorgánicos, el valor más alto de amonio fue registrado a principio de noviembre en CE ($8,2 \pm 0,2 \text{ } \mu\text{g.at.L}^{-1}$), y el valor mínimo en SE ($1,8 \pm 0,1 \text{ } \mu\text{g.at.L}^{-1}$) (Tabla 2). Los nitritos para casi todas las estaciones mostraron valores casi no detectables, donde el valor más alto fue encontrado en CE ($0,8 \pm 0,1 \text{ } \mu\text{g.at.L}^{-1}$) (Tabla 2). Los valores de fosfato más altos se registraron en la estación SE. El valor más alto fue

para SE a principios de noviembre ($11,5 \pm 0,2 \text{ } \mu\text{g.at.L}^{-1}$), al igual que en la estación CE ($7,6 \pm 0,1 \text{ } \mu\text{g.at.L}^{-1}$), que al parecer fue influenciada por la estación SE (Tabla 2). Los valores de silicatos más altos se registraron en la estación SE y CG, con el máximo en CG ($2683,8 \pm 0,7 \text{ } \mu\text{g.at.L}^{-1}$), el valor mínimo se encontró en BA a finales de noviembre ($549,3 \pm 21,2 \text{ } \mu\text{g.at.L}^{-1}$) (Tabla 2).

Factores biológicos

Clorofila *a*

La clorofila *a* mostró una tendencia en el tiempo en las estaciones muestreadas, donde los valores más altos se registraron a finales de septiembre en CE, BA y SE. El valor más alto se obtuvo en BA ($104,78 \pm 35,38 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$). A principios de noviembre no se registraron valores de clorofila *a* en las estaciones SE y CE (Figura 2).



Tabla 2. Valores promedio de nutrientes inorgánicos ($\mu\text{g-at/l}$) medidos en las estaciones estudio en el período septiembre-diciembre de 2007. BA, Boca de la Barra; CE, Centro; CG, Caño Grande; SE, Sevilla, DE: Desviación estándar.

Estaciones	Fecha	NH_4		NO_2		PO_4		SiO_4	
		Prom.	DE	Prom.	DE	Prom.	DE	Prom.	DE
BA	27-sep.	4,3	0,2	0,2	0,1	0,8	0,2	793,7	7,1
	13-oct.	4,6	0,4	0,2	0,1	1,5	0,4	1235	7,1
	02-nov.	5,6	0,4	0	0	1,3	0,3	1426,7	1,4
	23-nov.	7,5	0,4	0,2	0	0,4	0,2	549,3	21,2
	14-dic.	1,8	0,1	0,3	0,1	1,8	0,1	1716,7	21,2
CE	27-sep.	2,6	0,4	0,1	0	0,2	0,1	1244,4	13,4
	13-oct.	6	0,1	0,2	0,1	0,4	0,2	1709,1	70,7
	02-nov.	8,2	0,2	0,8	0,1	7,6	0,1	1183,7	2,1
	23-nov.	3,4	0,4	0,2	0	0,5	0,4	1778	21,2
	14-dic.	3,2	0	0,2	0	0,6	0,1	1742,8	21,2
CG	27-sep.	3,4	0,1	0,2	0	0,5	0,1	1236,4	2,1
	13-oct.	3,7	0,4	0,2	0,1	0,5	0,1	1495,1	2,8
	02-nov.	4	0,1	0,6	0,1	0,1	0,1	1540,9	0,1
	23-nov.	4,2	0,1	0,2	0	0,3	0,1	1208,8	0,7
	14-dic.	3,8	0,5	0,2	0	1,3	0,1	2683,8	0,7
SE	27-sep.	4,2	0,1	0,3	0,1	3,4	0,2	1558,5	2,1
	13-oct.	3,2	0,1	0,2	0,1	4,3	0,1	1780,5	20,5
	02-nov.	1,8	0,1	0,6	0,1	11,5	0,2	1847,1	3,5
	23-nov.	4,2	0,1	0,3	0,1	7,3	0,1	1520,8	14,1
	14-dic.	2,8	0,6	0,2	0	1,5	0,3	2057,8	28,3

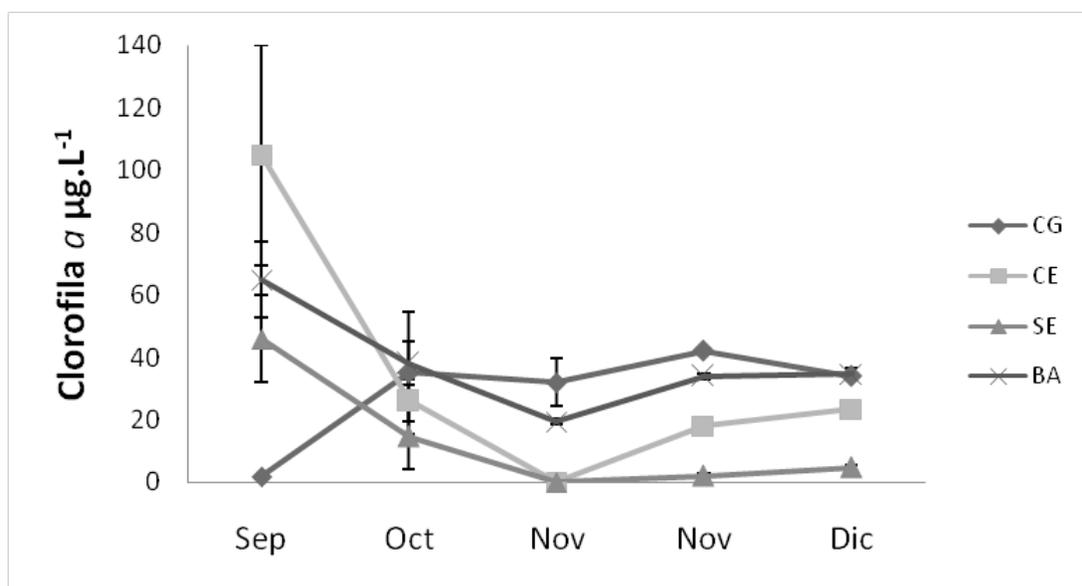


Figura 2. Concentración de clorofila a (en $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) de las estaciones de la CGSM, durante la época lluviosa (entre septiembre-diciembre de 2007). BA, Boca de la Barra; CE, Centro; CG, Caño Grande; SE, Río Sevilla.



Producción Primaria y Respiración

El valor más alto de PPN fue de $1,5 \text{ gC.m}^{-2}\text{d}^{-1}$ en la estación CE, presentándose en la primera quincena de diciembre, mientras que los valores más bajos se registraron en todas las estaciones para principio de Noviembre, llegando incluso a valores imperceptibles en algunas estaciones (Figura 3). La respiración de la comunidad (R) tuvo un comportamiento contrario a la PPN, donde los valores más altos para la mayoría de las estaciones se registraron a principio del mes de noviembre; sin embargo, la estación SE, en la primera quincena de diciembre, registró el valor más alto de R ($6,45 \pm 0,47 \text{ gC.m}^{-2}\text{d}^{-1}$) (Figura 3).

Relación entre variables ambientales y biológicas

La figura 4 hace referencia al análisis de componentes principales, donde los dos primeros componentes explican un 57% del porcentaje de varianza. Teniendo en cuenta los dos primeros componentes del análisis, la distribución de las estaciones de muestreo muestra dos grupos. En el primero, se observa una distribución de SE en los dos ejes del lado negativo, destacando una agrupación de tres meses consecutivos (sep-oct-nov) ubicados en el eje negativo inferior; esta agrupación fue influenciada por el aumento de la transparencia y de silicatos que entraron al sistema y, el segundo grupo, muestra una distribución de BA, a lo largo del eje superior positivo, e influenciada mayormente por las variables fisicoquímicas Salinidad, Temperatura, pH, OD y NH_4 . También se ve claramente que la mayoría de las estaciones se ubicaron en el eje positivo, tanto superior como inferior. Por otro lado, se observa la relación de los fosfatos con la estación SE y el tercer muestreo.

Balance metabólico

La tendencia mostró un patrón general a metabolismo heterotrófico en SE, CG y BA, mientras que CE tiene tres momentos con metabolismo autótrofo. En general, el 65% de las estaciones presentaron un comportamiento heterotrófico, a diferencia de un 35% con comportamiento autotrófico.

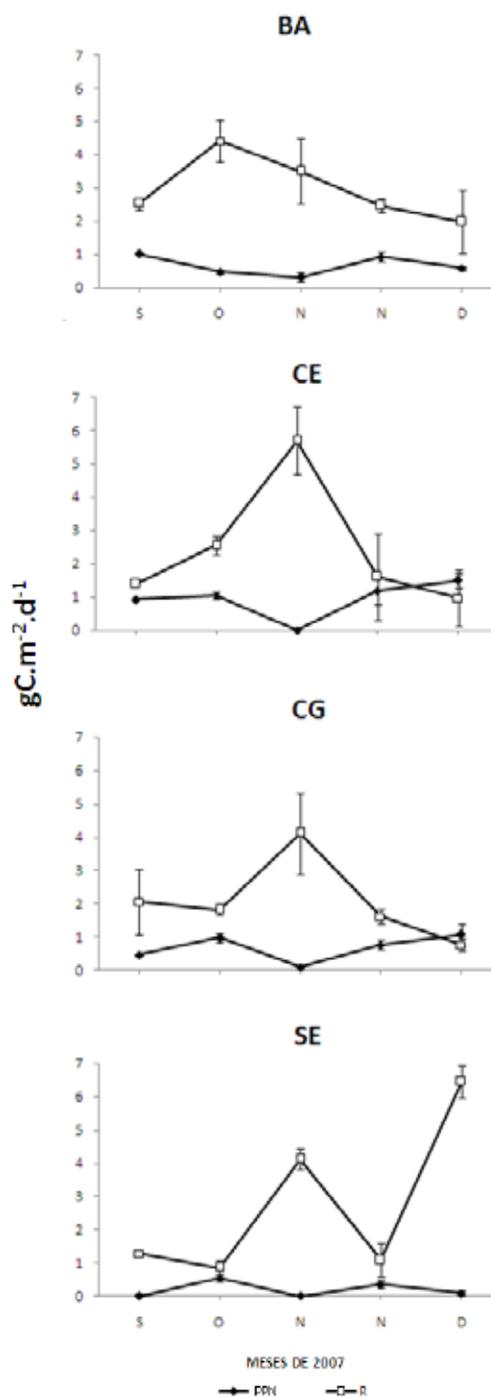


Figura 3. Producción primaria neta (PPN), expresada en $\text{gC.m}^{-2}\text{d}^{-1}$, en las estaciones BA(Boca de la Barra), CE(Centro), CG(Caño Grande) y SE(Río Sevilla), durante la época lluviosa (entre septiembre y diciembre del 2007).

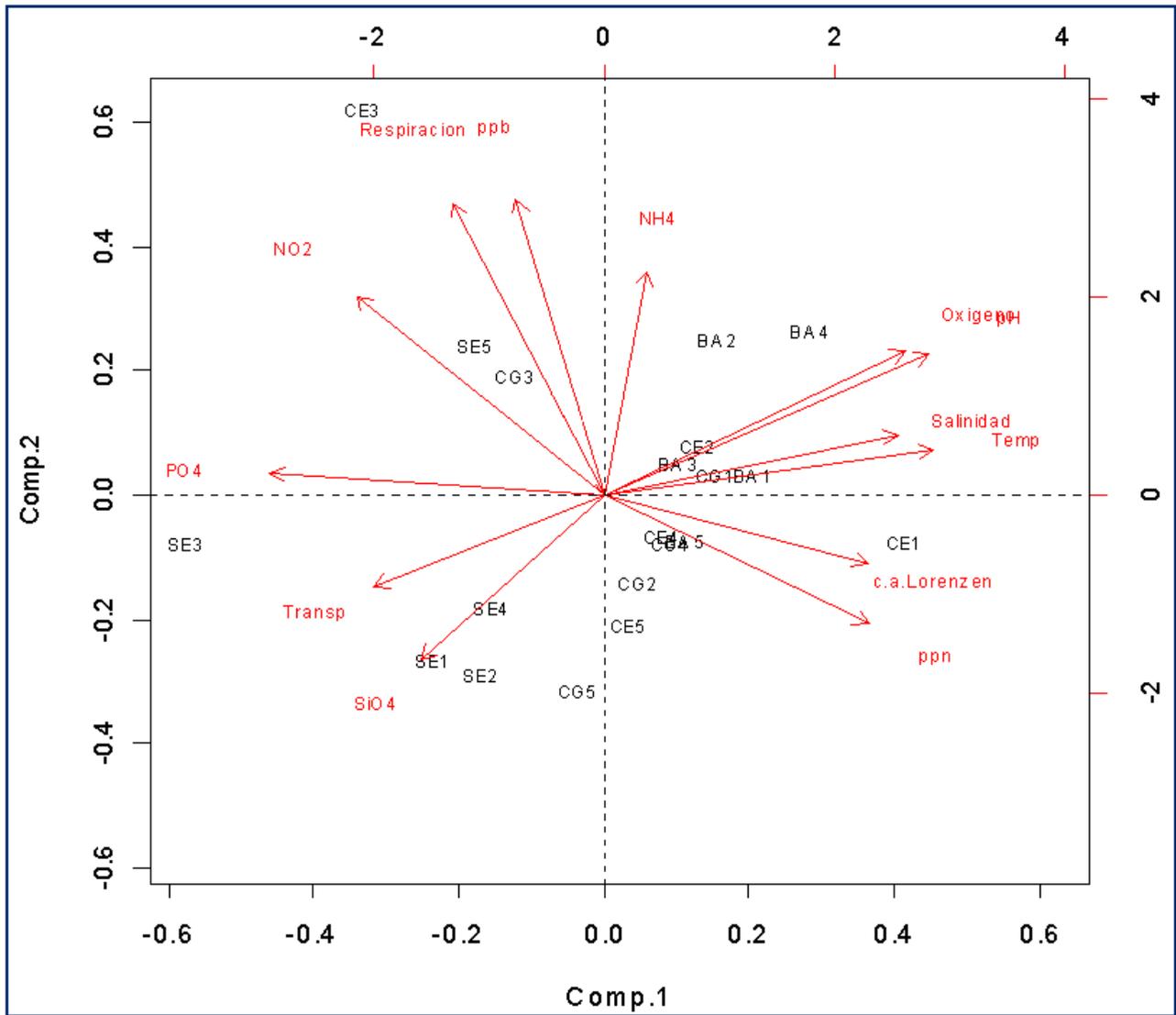


Figura 4. Análisis de Componentes Principales y correlación de las variables en las estaciones muestreadas en la CGSM durante la época lluviosa del 2007.

DISCUSIÓN

Durante la época de lluvias la CGSM manifestó variaciones fisicoquímicas y biológicas, donde la PPF parece estar condicionada a estos eventos. Según Blanco et al. (2006), los picos más altos de lluvias se registran de octubre a noviembre, coincidiendo con las variaciones de los parámetros analizados para esta misma fecha. En términos generales, la R fue superior a la PPF; este patrón puede ser explicado por el aporte de agua dulce, generado, en esta fecha, por los ríos que bajan de la SNSM.

En general, los valores de PPN, para la época del estudio, fueron bajos, siendo $1,5 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, el valor más alto encontrado. Una de las explicaciones a estos bajos valores de PPN, puede ser debido a la cantidad de agua que entra al sistema por parte de los ríos que bajan de la SNSM y, en especial, de la estación SE, haciendo que las comunidades del fitoplancton sean arrastradas por la fuerza de entrada del agua. La entrada de agua hace que los parches fitoplanctónicos, desarrollados en épocas de aguas bajas, se desprendan, disminuyendo así la densidad fitoplanctónica (Wiedemann, 1973). Este patrón fue confirmado con los bajos valores de



clorofila registrados durante todo el estudio. Esta entrada de agua también fue confirmada por los altos valores de fosfatos encontrados en la estación SE. Estos valores altos de fosfatos se dan porque, antes de entrar a la laguna, los ríos que bajan de las SNSM pasan por una zona de intensa explotación agrícola, lo cual, en tiempo de lluvias, hace que todas estas tierras sean lavadas, arrastrando gran cantidad de nutrientes que, finalmente, llegan a la ciénaga. Esto coincide con las concentraciones registradas por Hernández y Márquez (1991) y el informe anual del INVEMAR, donde los resultados de fosfatos analizados, durante el 2007, mostraron las variaciones entre las diferentes zonas de muestreo, destacando que existen aportes de ortofosfatos al sistema lagunar, a través de los ríos de la SNSM (INVEMAR, 2007). La influencia de los ríos sobre la CGSM también se observó en las concentraciones de nutrientes (amonio, nitritos y fosfatos), los cuales, de manera general, fueron superiores cuando la salinidad descendió.

Algunos autores proponen que la transparencia podría estar regulando la PPF, tanto en la CGSM como en la CP (Hernández y Gocke, 1990; Hernández y Márquez, 1991, Rondón, 1991). En este estudio, los valores más altos de transparencia se registraron en la estación SE, contrastando con los valores más bajos de PPN que se registraron en esta estación, lo cual no coincide con lo planteado por otros autores. Esta misma falta de relación fue reportada por Rodríguez et al. (2009) en la CP.

En los estudios realizados en la CGSM y CP no se ha encontrado relación alguna entre los nutrientes inorgánicos y la PPF (Hernández y Gocke, 1990; Hernández y Márquez, 1991; Rondón, 1991; Rodríguez et al., 2009); al igual, en este estudio, tampoco se encontró correlación entre estas variables. Una posible razón a la falta de relación entre estas variables puede ser explicada por el retraso temporal entre la asimilación de nutrientes y el reflejo en el incremento de la PPF, la sucesión de tipos de fitoplancton adaptados a diferentes necesidades nutricionales y el control de la biomasa del fitoplancton por la herbivoría (Zea et al., 1998; Rodríguez et al., 2009).

Se encontró una gran tendencia hacia la heterotrofia durante la época de lluvia en el sistema lagunar estuarino CGSM, con un 65%, contrastando con un 35% de autotrofia, indicando que hay una gran influencia en el ingreso de agua dulce, lo que es característico

de la época de lluvias, que ocurren entre septiembre y diciembre, periodo en el cual se realizó este estudio. La entrada de agua en época de lluvias, hace que el sistema respire más de lo que produce, debido a la gran cantidad de material orgánico particulado que ingresa de los afluentes y caños que alimentan a la CGSM. Así, la respiración de la comunidad supera la PPF, lo que a su vez resulta en una producción neta negativa (-PPN) y una relación PPF / R por debajo de la unidad.

La PPF fue alta en comparación a la PPF encontrada en otros ecosistemas similares, sin embargo, esta no superó a la R la cual obtuvo valores más altos, llegando casi a triplicarla. Estudios pioneros en la CGSM de PPF, establecen que este es un sistema altamente productivo, donde la PPF es más grande que la R, lo cual hace que el balance entre la entrada principal de energía vía fitoplancton y vía subsidio, sea mayor que los costos de mantenimientos de la estructura del ecosistema (Hernández y Gocke, 1990; Hernández y Márquez 1991), lo cual se refleja en los valores altos de PPF, en la que la respiración es el principal componente de la PPF.

Estos estudios encajan con la hipótesis del outwelling (Winter et al., 1996) donde se establece que estos sistemas autotróficos son fuentes exportadores de carbono orgánico. En 1997, durante la recomunicación de la CGSM con el río Magdalena, a través del canal Clarín, se reportaron eventos de heterotrofia en diferentes estaciones y lagunas de la ecorregión CGSM (Gocke et al, 2003). No obstante, se consideró que estos eventos eran poco frecuentes, por lo tanto toda la CGSM correspondía a un sistema autotrófico. Sin embargo, resultados de un estudio reciente en el Complejo Pajarales, sistemas de lagunas adyacentes a la CGSM, indican un comportamiento completamente heterotrófico durante la época lluviosa del año 2005 y durante el 2006; el metabolismo tendió a un estado más balanceado pero con eventos importantes de heterotrofia (Rodríguez, 2007). Los resultados indican que la CGSM presentó una mayor frecuencia en eventos de heterotrofia que, sumados con los de Rodríguez et al. (2009), contrastan con lo establecido por Hernández y Márquez (1991) y por Hernández y Gocke (1990) para la CGSM. Sin embargo, para poder dar un estimativo con bases más sólidas se hace necesario un seguimiento de este comportamiento durante todo un ciclo anual, que brindaría una respuesta más concluyente de cómo es el balance metabólico en el sistema lagunar estuarino CGSM y su relación con la estacionalidad climática.



AGRADECIMIENTOS

Al Fondo Patrimonial para la Investigación FONCIENCIAS de la Universidad del Magdalena, por el apoyo financiero para poder llevar a cabo este proyecto y a todas las personas que de una u otra manera aportaron un grano de arena para que este proyecto fuera una realidad.

BIBLIOGRAFÍA

APHA, 1998. Standard Methods for examination of water and wastewater. 20th Edition. 1161 p.

Bifani, P. 1999. Medio ambiente y desarrollo sostenible, Editorial IEPALA Instituto de Estudios Políticos para América.

Blanco, J.A., E.A. Vilorio y J.C. Narváez. 2006. ENSO and salinity changes in the Ciénaga Grande de Santa Marta coastal lagoon system, Colombian Caribbean. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 66: 157-167.

Botero, L. y J.E. Mancera. 1996. Síntesis de los cambios de origen antrópico ocurridos en los últimos 40 años en la Ciénaga Grande de Santa Marta (Colombia). *Revista. Academia colombiana de ciencias exactas físicas y naturales*. 20: 465-474.

Botero, L. y H. Salzwedel. 1999. Rehabilitation of the Ciénaga Grande de Santa Marta, a mangrove-estuarine system in the Caribbean coast of Colombia. *Ocean Coastal Management*. 42: 243-256.

Calbet, A. y M.R., Landry. 2004. Phytoplankton growth, microzooplankton grazing, and carbon cycling in marine systems. *Limnology and Oceanography*. 49:51-57.

Cloern, J. 1991. Tidal stirring and phytoplankton bloom dynamics in an estuary. *Journal of Marine Research*. 49: 203-221.

Day, Jr. J. W., C. A. S. Hall, W. M. Kemp y A. Yáñez-Arancibia. 1989. *Estuarine ecology*, Wiley Interscience, New York. 576 p.

Escobar, A. 1989. Clorofila "a", materia en suspensión, DBO, hidrografía y niveles de contaminación fecal del Complejo de Ciénagas de Pajara, Caribe colombiano: informe final -1989. 44.

FAO, 1994. Manejo y aprovechamiento acuícola de lagunas costeras en América latina y el caribe. Trabajos presentados por Brasil, Colombia, Cuba, México y Venezuela. 169 p.

Gaarden, T. y H.H. Gran. 1927. Investigation of the production of the plankton in the Oslo Fjord. *International Council for the Exploration of the Sea*. 42: 1-48.

Giraldo, R., W. Troncoso, J.E. Mancera y N. Mendez. 2000. Geoestadística: Una herramienta para la modelación en estuarios. *Revista. Academia colombiana de ciencias exactas físicas y naturales*. 24(90):59-72.

Gocke, K. 1987. Manual para determinar los procesos de producción y degradación en biotopos marinos, especialmente en lagunas costeras y manglares. Mimeógrafo en la biblioteca del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras INVEMAR. Santa Marta, Colombia. 56 p.

Gocke, K., E. Mancera, A. Vidal, D. y Fonseca. 2003. Planktonic Primary Production and Community Respiration in Several Coastal Lagoons of the Outer Delta of the Rio Magdalena, Colombia. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*. 32: 125-144.

Hernández, C. y K. Gocke. 1990. Productividad primaria en la Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. *Anales del Instituto de Investigaciones Marinas de Punta Betín*. 19-20: 101-119.

Hernández, C. y G. Márquez. 1991. Producción primaria en el ecosistema Ciénaga Grande de Santa Marta, laguna costera del Caribe Colombiano. *Trianea*. 4; 385-407.

Howarth, R. W., R. Schneider y D. Swaney. 1996. Metabolism and organic carbon fluxes in the tidal freshwater Hudson River. *Estuaries*. 19: 848-865.

INVEMAR, 2000. Monitoreo de las condiciones ambientales y los cambios estructurales y funcionales de las comunidades vegetales y de recursos pesqueros durante la rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta: Un enfoque de manejo adaptativo. Informe Técnico Final 2001. MMA-BID-INVEMAR. 193 p.

INVEMAR, 2005. Monitoreo de las condiciones ambientales y los cambios estructurales y funcionales de las comunidades vegetales y de recursos pesqueros durante la rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Informe 2005. MMA-BID-INVEMAR. Santa Marta, Colombia.

INVEMAR, 2007. Monitoreo de las condiciones ambientales y los cambios estructurales y funcionales de las comunidades vegetales y de los recursos pesqueros durante la rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta. MMA-BID-INVEMAR. Santa Marta, 122 p.

Landry, M., W. Peterson y C. Lorenzen. 1995. Zooplankton grazing phytoplankton Landscape Level. *University of Chicago Press*, 301-316 p.

Lorenzen, C.J. 1967. Determination of chlorophyll and pheopigments: spectronic equation. *Limnology and Oceanography*. 12: 343-346.



- Mancera, J.E. 2003. The influence of mangrove outwelling to coastal food webs as a function of environmental settings. Ph.D. Dissertation, University of Louisiana at Lafayette, USA, 191 p.
- Odum, E. 1972. *Ecología*. Editorial Interamericana S.A., México, 639 p.
- Polania, J., A. Santos-Martínez, J.E. Mancera y L. Botero. 2001. The coastal lagoon Ciénaga Grande de Santa Marta. In: U. Seeliger and B. Kjerfve (eds.): *Coastal marine ecosystems of Latin America*. Springer Verlag Berlin Heidelberg. 33 p.
- Rodríguez-Chila, J.D., J.E. Mancera-Pineda y H.J. López-Salgado. 2009. Efectos de la recomunicación del Río Magdalena con su antiguo delta: cambios en la producción primaria fitoplanctónica y respiración en el complejo Pajarales, 1989 A 2005. *Boletín de Investigaciones. Marinas y Costeras*. 38(2):119-144.
- Rodríguez, J. CH. 2007. *Producción Primaria Fitoplanctónica y Respiración Pelágica en el Complejo Pajarales-Ciénaga Grande de Santa Marta, Después de su Recomunicación con el Río Magdalena*. Tesis de pregrado programa de Biología. Universidad del Magdalena Santa Marta. 88 p.
- Rondón, E. H. 1991. Estimación de la productividad primaria fitoplanctónica en las ciénagas del Complejo Pajarales, Caribe Colombiano. Tesis de Biología, Universidad Javeriana, Bogotá. 80 p.
- Schindler, D.W., G.J. Brunskill, S. Emerson, W.S. Broecker y T.H. Peng. 1972. Atmospheric carbon dioxide: Its role in maintaining phytoplankton standing stocks. *Science* 177:1192-1194.
- Smith, S.V. y J.T. Hollibaugh. 1997. Annual cycle and intertidal variability of ecosystem metabolism in a temperate climate environment. *Ecology Monographs*. 67: 509-5.
- Stearns, D., Litaker, W. y G. Rosenberg. 1987. Impacts of zooplankton grazing and excretion on short-interval fluctuations in chlorophyll-a and nitrogen concentrations in a well-mixed estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 24: 305-325 p.
- Strickland, J.D.H. 1965 Production of Organic Matter in the Primary Stages of the Marine Food Chain. In: RILEY, J. P.; SKIRROW G. *Chemical Oceanography* Academic Press Inc. (London) Ltda, vol I, 711 p.
- Strickland, J. y T. Parsons. 1972. *A practical handbook of sea water analysis*. Fisheries. Research. Board of Canada. 167-311 p.
- Twilley, R.R., V.H. Rivera-Monroy, R. Chen y L. Botero. 1999. Adapting and ecological mangrove model to simulate trajectories in restoration ecology. *Marine Pollution Bulletin*. 37(8-12): 404-419.
- Vollenweider, R. 1974. *A manual on methods for measuring primary production in aquatic environments*. Second Edition. International Biological Program. Blackwell scientific publications. Oxford. 225 p.
- Wiedemann, H., 1973. Reconnaissance of the Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia: physical parameters and geological history. *Mitteilungen des Instituto Colombo-Alemán de Investigaciones Científicas*. 7: 85-119 p.
- Winter, P.E.D., T.A. Schlachter y D. Baird. 1996. Carbon flux between an estuary and the ocean: A case of outwelling. *Hydrobiologia*. 337: 123- 132.
- Zea, S., R. Giraldo H., J. E. Mancera y J. Martínez-C. 1998. Relaciones contemporáneas y rezagadas entre variables físico-químicas y biológicas en la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones. Marinas y Costeras*. 27: 67-85.

Fecha de recepción: 13/08/2010

Fecha de aceptación: 14/01/2011

